



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 101 23 727 A 1**

⑤1 Int. Cl. 7:  
**G 02 B 1/02**  
G 02 F 1/00  
G 03 F 7/20

②1 Aktenzeichen: 101 23 727.8  
②2 Anmeldetag: 15. 5. 2001  
④3 Offenlegungstag: 21. 11. 2002

DE 101 23 727 A 1

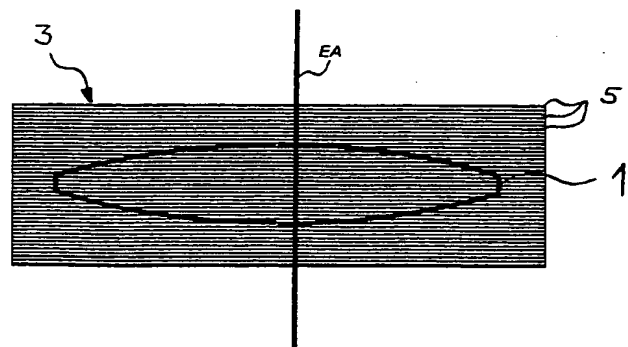
⑦1 Anmelder:  
Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

⑦2 Erfinder:  
Brunotte, Martin, 73431 Aalen, DE; Wagner,  
Christian, 73430 Aalen, DE; Kaiser, Winfried, 73431  
Aalen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 Optisches Element, Projektionsobjektiv und Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit Fluoridkristall-Linsen

⑤7 Optisches Element (1) aus einem Fluorid-Kristall, insbesondere für ein Projektionsobjektiv einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei das optische Element eine Elementachse (EA) aufweist, welches annähernd senkrecht auf den (100)-Kristallebenen oder auf den (010)-Kristallebenen oder auf den (001)-Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht. Derartige optische Elemente kommen in Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zum Einsatz. Um den störenden Einfluß der Doppelbrechung weiter zu reduzieren, werden die optischen Elemente aus Fluorid-Kristall gegeneinander um die optische Achse verdreht angeordnet.



DE 101 23 727 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft ein optisches Element nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Derartige optische Elemente sind aus der US 6,201,634 bekannt. Dort ist offenbart, daß bei der Herstellung der optischen Elemente idealerweise die Elementachsen der optischen Elemente senkrecht zu den (111)-Kristallebenen der Fluorid-Kristalle ausgerichtet werden, um die Spannungsdoppelbrechung zu minimieren. Die US 6,201,634 geht dabei davon aus, daß Fluorid-Kristalle keine intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

[0003] Aus der Internet-Publikation "Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in CaF<sub>2</sub>" von John H. Burnett, Eric L. Shirley, and Zachary H. Levine, NIST Gaithersburg MD 20899 USA (verbreitet am 07.05.01) ist jedoch bekannt, daß Kalzium-Fluorid-Einkristalle auch nicht spannungsinduzierte, also intrinsische Doppelbrechung aufweisen. Die dort präsentierten Messungen zeigen, dass bei Strahlausbreitung in der (110)-Kristallrichtung eine Doppelbrechung von  $(6.5 \pm 0.4)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 156.1$  nm, von  $(3.6 \pm 0.2)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 193.09$  nm und von  $(1.2 \pm 0.1)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 253.65$  nm für Kalzium-Fluorid auftritt. Bei einer Strahlausbreitung in der (100)-Kristallrichtung und in der (111)-Kristallrichtung weist Kalzium-Fluorid dagegen keine intrinsische Doppelbrechung auf, wie dies auch von der Theorie vorhergesagt wird. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit stark richtungsabhängig und nimmt mit kleiner werdender Wellenlänge deutlich zu.

[0004] Auf Grund der Symmetrieeigenschaften der kubischen Kristalle gelten in den folgenden Ausführungen Aussagen zur Strahlausbreitung in (110)-Kristallrichtung auch immer für die Strahlausbreitung in (101)-Kristallrichtung, bzw. in (011)-Kristallrichtung. Gleiches gilt auch für Aussagen zur Strahlausbreitung in (100)-Kristallrichtung, (010)-Kristallrichtung und (001)-Kristallrichtung. Die Kristallrichtung gibt dabei immer die Richtung der Flächennormalen auf die entsprechende Kristallebene an. So zeigt die Kristallrichtung (100) in Richtung der Flächennormalen der Kristallebene (100). Aussagen zu den auf Grund der Kristallsymmetrie entsprechenden Kristallrichtungen, beziehungsweise den Kristallebenen, die sich nur durch Permutationen der Ziffern "0" und "1" ergeben, werden deshalb nicht explizit aufgeführt, sondern sollten implizit mitgelesen werden, wenn zu einer dieser Kristallrichtungen, beziehungsweise Kristallebene Feststellungen getroffen werden.

[0005] Projektionsobjektive und Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen sind beispielsweise aus der Patentanmeldung PCT/EP00/13184 der Anmelderin und den darin zitierten Schriften bekannt. Die Ausführungsbeispiele dieser Anmeldung zeigen geeignete rein refraktive und katadioptrische Projektionsobjektive mit numerischen Aperturen von 0,8 und 0,9, bei einer Betriebswellenlänge von 193 nm sowie 157 nm.

[0006] Aufgabe der Erfindung ist es, optische Elemente für ein Projektionsobjektiv sowie Projektionsobjektive für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage anzugeben, bei denen der Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung minimiert ist.

[0007] Gelöst wird diese Aufgabe mit einem optischen Element gemäß Anspruch 1, einen Projektionsobjektiv gemäß Anspruch 4 und Anspruch 19, einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 20 und einem Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen gemäß Anspruch 21. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

[0008] Um den Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung zu minimieren, schlägt Anspruch 1 vor, bei optischen Elementen aus einem Fluorid-Kristall die Elementachsen so auszurichten, daß sie mit der (100)-Kristallrichtung bis auf eine maximale Abweichung von 5° zusammenfallen. Die Elementachse ist dabei beispielsweise durch eine Symmetrieachse des optischen Elements, oder bei Bestrahlung des optischen Elements durch die Mitte des einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade gegeben, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb des optischen Elements minimal sind. Als optische Elemente kommen beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen sowie Korrekturplatten mit Freiformkorrekturflächen in Frage. Die Ausrichtung der Elementachse in (100)-Kristallrichtung hat den Vorteil, dass sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung, der sich bei Lichtausbreitung in (110)-Kristallrichtung ergibt, erst bei sehr hohen Öffnungswinkeln der Lichtstrahlen bemerkbar macht. Unter Öffnungswinkel versteht man in diesem Zusammenhang den Winkel zwischen einem Lichtstrahl und der Elementachse innerhalb des optischen Elements. Erst wenn die Öffnungswinkel in den Bereich des Winkels zwischen der (100)-Kristallrichtung und der (110)-Kristallrichtung kommen, spüren die entsprechenden Lichtstrahlen den Einfluss der Doppelbrechung. Der Winkel zwischen der (110)-Kristallrichtung und der (100)-Kristallrichtung beträgt dabei 45°. Wäre die Elementachse dagegen in (111)-Kristallrichtung ausgerichtet, so würde sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung schon bei kleineren Öffnungswinkeln bemerkbar machen, da der Winkel zwischen der (110)-Kristallrichtung und der (111)-Kristallrichtung nur 35° beträgt.

[0009] Wird diese Winkelabhängigkeit der Doppelbrechung beispielsweise durch das Herstellverfahren des Fluorid-Kristalls oder die mechanische Beanspruchung des optischen Elements hervorgerufen, so können die offenbarten Lösungsansätze selbstverständlich zur Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung angewendet werden.

[0010] Vorzugsweise handelt es sich bei den optischen Elementen um rotationssymmetrische Linsen. In diesem Fall fällt die Symmetrieachse der Linsen mit der Elementachse der optischen Elemente zusammen.

[0011] Als Material für die optischen Elemente wird in Projektionsobjektiven vorzugsweise Kalzium-Fluorid eingesetzt, da Kalzium-Fluorid bei gemeinsamem Einsatz mit Quarz bei einer Arbeitswellenlängen von 193 nm sich zur Farbkorrektur besonders eignet, beziehungsweise bei einer Arbeitswellenlänge von 157 nm eine ausreichende Transmission bereitstellt. Aber auch für die Fluorid-Kristalle Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid gelten die hier getroffenen Aussagen, da es sich um Kristalle vom gleichen kubischen Kristall-Typ handelt.

[0012] Gemäß Anspruch 4 werden die optischen Elemente, bei denen die Elementachsen annähernd senkrecht auf den (100)-Kristallebenen stehen, vorzugsweise in Projektionsobjektiven einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage eingesetzt. Dabei müssen nicht alle optischen Elemente des Projektionsobjektives eine derartige Ausrichtung der Kristallebenen aufweisen. Diejenigen optischen Elemente, bei denen die Elementachsen senkrecht auf den (100)-Kristallebenen stehen, werden im Folgenden auch als ausgezeichnete optische Elemente bezeichnet.

[0013] Projektionsobjektive weisen eine optische Achse auf, welche von der Objektebene zur Bildebene verläuft. Vor-

zugsweise sind die optischen Elemente zentriert um diese optische Achse aufgebaut, so dass auch die Elementachsen mit der optischen Achse zusammenfallen.

[0014] Der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung macht sich besonders dann bemerkbar, wenn die Lichtstrahlen innerhalb der optischen Elemente große Öffnungswinkel aufweisen. Dies ist für Projektionsobjektive der Fall, die eine bildseitige numerische Apertur aufweisen, die größer als 0.75, insbesondere größer 0.85 ist.

[0015] Bei Projektionsobjektiven mit derart großen numerischen Aperturen treten innerhalb der ausgezeichneten optischen Elemente Öffnungswinkel auf, die größer als 25°, insbesondere größer als 30° sind. Gerade bei diesen großen Öffnungswinkeln kommt die Erfindung zum Tragen, die Elementachsen in (100)-Kristallrichtung zu orientieren. Wären die Elementachsen in (111)-Kristallrichtung orientiert, so würden die Lichtstrahlen mit Öffnungswinkeln größer als 25°, insbesondere größer als 30° deutlich den störenden Einfluss der Doppelbrechung spüren, welche für Öffnungswinkel von 34° maximal ist.

[0016] Da andererseits der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung bei einem Öffnungswinkel von 45° maximal werden kann, ist es vorteilhaft, das Projektionsobjektiv so auszulegen, dass alle Öffnungswinkel der Lichtstrahlen kleiner 45° sind, insbesondere kleiner gleich

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

sind, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und  $n_{FK}$  die Brechzahl des Fluorid-Kristalls. Dies wird erreicht, indem die Linsen, die nahe an der Bildebene angeordnet sind, sammelnde Linsenflächen oder höchstens leicht zerstreuliche Linsenflächen aufweisen.

[0017] Große Öffnungswinkel treten hauptsächlich bei optischen Elementen in der Nähe von Feldebene, insbesondere der Bildebene auf. Die ausgezeichneten optischen Elemente sollten deshalb vorzugsweise im Bereich der Feldebene eingesetzt werden. Der Bereich, indem die ausgezeichneten optischen Elemente eingesetzt werden sollten, lässt sich über das Verhältnis des Elementdurchmessers zum Durchmesser der Blende bestimmen. So beträgt der Elementdurchmesser des ausgezeichneten optischen Elements vorzugsweise maximal 85%, insbesondere maximal 80% des Blendendurchmessers.

[0018] Bei Projektionsobjektiven mit einer bildseitig numerischen Apertur von größer als 0.75 treten die größten Öffnungswinkel in der Regel in dem der Bildebene am nächsten gelegenen optischen Element auf. Deshalb wird vorzugsweise bei diesem optischen Element die Elementachse in Richtung der (100)-Kristallrichtung ausgerichtet.

[0019] Die intrinsische Doppelbrechung ist dabei nicht nur vom Öffnungswinkel eines Lichtstrahls, sondern auch vom Azimutwinkel des Lichtstrahls um die Elementachse abhängig. Der Azimutwinkel eines Lichtstrahls wird dabei folgendermaßen bestimmt: Ist die Elementachse beispielsweise in (100)-Kristallrichtung orientiert, so wird der Lichtstrahl in die (100)-Kristallebene projiziert. Ebenso werden die Richtungsvektoren der (101)-, (110)-, (101)- und (110)-Kristallrichtungen mit maximaler intrinsischer Doppelbrechung in die (100)-Kristallebene projiziert. Der Azimutwinkel wird nun zwischen dem projizierten Lichtstrahl und dem projizierten Richtungsvektor der (101)-Kristallrichtung bestimmt. Die entsprechenden Definitionen gelten natürlich auch für die Fälle, bei denen die Elementachse in der (010)-Kristallrichtung oder in der (001)-Kristallrichtung orientiert ist. Die intrinsische Doppelbrechung weist somit eine vierzählige Symmetrie auf, wenn die Elementachse in (100)-Kristallrichtung orientiert ist. Eine maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich dabei für Azimutwinkel von 0°, 90°, 180° und 270°, während sie für Winkel von 45°, 135°, 225° und 315° nahezu verschwindet. Werden in einem Projektionsobjektiv mehrere ausgezeichnete optische Elemente eingesetzt, so ist es vorteilhaft, wenn die ausgezeichneten optischen Elemente gegeneinander um die optische Achse verdreht angeordnet sind. Dadurch lässt sich vermeiden, dass sich der störende Einfluss durch die intrinsische Doppelbrechung additiv überlagert.

[0020] Werden beispielsweise zwei ausgezeichnete optische Elemente eingesetzt, so ist es vorteilhaft, wenn der Drehwinkel zwischen den optischen Elementen annähernd 45° beträgt.

[0021] Besonders effektiv wird die Drehung der einzelnen ausgezeichneten optischen Elemente gegeneinander dann, wenn die ausgezeichneten optischen Elemente benachbart angeordnet sind.

[0022] Die intrinsische Doppelbrechung nimmt mit abnehmender Arbeitswellenlänge deutlich zu. So ist die intrinsische Doppelbrechung bei einer Wellenlänge von 193 nm mehr als doppelt so groß, bei einer Wellenlänge von 157 nm mehr als fünfmal so groß wie bei einer Wellenlänge von 248 nm. Die Erfindung lässt sich deshalb besonders dann vorteilhaft einsetzen, wenn die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200 nm, insbesondere kleiner 160 nm aufweisen.

[0023] Bei dem Projektionsobjektiv kann es sich dabei um ein rein refraktives Objektiv handeln, das aus einer Vielzahl von rotationssymmetrisch um die optische Achse angeordneten Linsen besteht.

[0024] Aber auch bei Projektionsobjektiven vom katadioptrischen Objektivtyp verbessert sich die Abbildungsleistung, wenn die Linsen mit großen Öffnungswinkeln der Lichtstrahlen derart orientiert sind, dass die Symmetrieachsen der Linsen in (100)-Kristallrichtung weisen.

[0025] Da der Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung abhängig vom Azimutwinkel eines Lichtstrahls ist, kann die Abbildungsleistung eines Projektionsobjektives dadurch gesteigert werden, dass die optischen Elemente gegeneinander um die optische Achse verdreht angeordnet werden. Die Drehung bezieht sich dabei jeweils auf die Kristallstruktur der einzelnen optischen Elemente. So sollte ein Lichtstrahl auf seinem Weg von der Objektebene zur Bildebene nur begrenzt mit den azimuthalen Winkelbereichen mit erhöhter intrinsischer Doppelbrechung in Berührung kommen. Die azimuthalen Winkelbereiche mit erhöhter intrinsischer Doppelbrechung werden dabei durch die (110)-Kristallrichtung, bzw. die Kristallrichtungen, bei denen die Ziffern "1", "1" und "0" permutiert werden, vorgegeben.

[0026] Derartige Projektionsobjektive lassen sich vorteilhaft in Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsoptiken einsetzen, die ausgehend von der Lichtquelle ein Beleuchtungssystem, ein Masken-Positioniersystem, eine Struktur tragende Maske, ein Projektionsobjektiv, ein Objekt-Positionierungssystem und ein Licht empfindliches Substrat umfassen.

[0027] Mit dieser Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage lassen sich mikrostrukturierte Halbleiter-Bauelemente herstellen.

[0028] Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

[0029] Fig. 1 zeigt einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block senkrecht zu den (100)-Kristallebenen zusammen mit einem erfindungsgemäßen optischen Element in schematischer Darstellung;

[0030] Fig. 2 zeigt ein erfindungsgemäßes optisches Element in einer schematischen dreidimensionalen Darstellung;

[0031] Fig. 3 zeigt ein Koordinatensystem zur Definition des Öffnungswinkels und des Azimuthwinkels;

[0032] Fig. 4 zeigt den Verlauf der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$ ;

[0033] Fig. 5 zeigt den Verlauf der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimuthwinkels  $\alpha$ ;

[0034] Fig. 6 zeigt den Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs;

[0035] Fig. 7 zeigt den Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs; und

[0036] Fig. 8 zeigt eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage in schematischer Darstellung.

[0037] Fig. 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block 3. Der Schnitt ist so gewählt, dass die (100)-Kristallebenen 5 als einzelne Linien zusehen sind, so dass die (100)-Kristallebenen 5 sich senkrecht zur Papierebene befinden. Der Fluorid-Kristall-Block 3 dient als Ausgangsmaterial für das optische Element 1. In diesem Beispiel ist das optische Element 1 eine Bikonvex-Linse mit der Elementachse EA, die zugleich Symmetrieachse der Linse ist. Das optische Element 1 wird nun so aus dem Fluorid-Kristall-Block herausgearbeitet, daß die Elementachse EA senkrecht auf den (100)-Kristallebenen steht.

[0038] In Fig. 2 wird nochmals mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, weshalb es besonders günstig ist, die Elementachse EA der optischen Elemente in (100)-Kristallrichtung zu orientieren. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 201 aus Kalzium-Fluorid als optisches Element. Die Elementachse EA zeigt dabei in (100)-Kristallrichtung. Neben der (100)-Kristallrichtung sind auch die (101)-, (110)-, (101)- und (110)-Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch vier "Keulen" 207 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben.

[0039] Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich jeweils in den (101)-, (110)-, (101)- und (110)-Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von  $45^\circ$  und einem Azimuthwinkel von  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$ . Für Azimuthwinkel von  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $315^\circ$  sowie für einen Öffnungswinkel von  $0^\circ$  verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

[0040] Die Definition von Öffnungswinkel  $\theta$  und Azimuthwinkel  $\alpha$  ist in Fig. 3 dargestellt. Für das Beispiel von Fig. 2 zeigt dabei die z-Achse in (100)-Kristallrichtung, die x-Achse in (101)-Kristallrichtung.

[0041] Aus Messungen ist bekannt, dass bei Strahlausbreitung in der (110)-Kristallrichtung eine Doppelbrechung von  $(6.5 \pm 0.4) \text{ nm/cm}$  bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 156.1 \text{ nm}$  für Kalzium-Fluorid auftritt.

[0042] In Fig. 4 ist die intrinsische Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimuthwinkel  $\alpha = 0^\circ$  dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von  $6.5 \text{ nm/cm}$  bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 45^\circ$  entspricht dem experimentellen Ergebnis. Der Kurvenverlauf geht von der Modellannahme aus, dass die intrinsische Doppelbrechung erst ab einem Öffnungswinkel von  $\theta = 25^\circ$  stark ansteigt.

[0043] In Fig. 5 ist die intrinsische Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimuthwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 45^\circ$  dargestellt. Die vierzählige Symmetrie ist offensichtlich. Der Kurvenverlauf berücksichtigt die Tatsache, daß die intrinsische Doppelbrechung bei einem Azimuthwinkel von  $\alpha = 45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $315^\circ$  verschwindet.

[0044] In Fig. 6 ist der Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs 611 für die Wellenlänge  $157 \text{ nm}$  dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektivs sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP00/13184 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Fig. 7 beziehungsweise Tabelle 6. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP00/13184 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt  $0.9$ . Die Abbildungsleistung dieses Objektivs ist so gut korrigiert, dass die Abweichung von der Wellenfront einer idealen Kugelwelle kleiner  $1.8 \text{ m}\lambda$  bezogen auf die Wellenlänge von  $157 \text{ nm}$  ist. Gerade bei diesen Hochleistungsobjektiven ist es erforderlich, dass störende Einflüsse wie die der intrinsischen Doppelbrechung so weit wie möglich reduziert werden.

[0045] Für das Ausführungsbeispiel der Fig. 6 wurden die Öffnungswinkel  $\alpha$  des Randstrahls 609 für die einzelnen optischen Elemente L601 bis L630 berechnet. Der Randstrahl 609 geht dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten  $x = 0 \text{ mm}$  und  $y = 0 \text{ mm}$  aus und weist in der Bildebene einen Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welcher der bildseitigen numerischen Apertur entspricht. Der Randstrahl 609 wird deshalb herangezogen, da sich für ihn nahezu die maximalen Öffnungswinkel innerhalb der optischen Elemente ergeben. Die Öffnungswinkel  $\alpha$  für den Randstrahl 609 sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2

Linsen-Nr.	Öffnungs- winkel $\alpha$ [°]	Linsen-Nr.	Öffnungs- winkel $\alpha$ [°]
L601	8.1	L616	-1.3
L602	8.7	L617	26.4
L603	7.8	L618	33.5
L604	10.7	L619	26.5
L605	9.4	L620	19.3
L606	10.3	L621	6.7
L607	21.8	L622	-10.3
L608	25.4	L623	-11.9
L609	16.3	L624	0.3
L610	12.2	L625	6.0
L611	2.3	L626	-24.0
L612	2.3	L627	-35.6
L613	-18.3	L628	-39.4
L614	-18.7	L629	-35.3
L615	-14.0	L630	-35.3

[0046] Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass die Öffnungswinkel  $\theta$  für die Linsen L608, L617, L618, L619, L627, L628, L629 und L630 größer als 25°, für die Linsen L618, L627, L628, L629 und L630 sogar größer als 30° sind. Mindestens bei diesen Linsen sollte deshalb die Elementachse in (100)-Kristallrichtung ausgerichtet sein. Besonders betroffen von hohen Öffnungswinkeln sind die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L627 bis L630. Damit sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung dieser vier Linsen nicht additiv überlagert, sollten diese vier Linsen gegeneinander um die optische Achse gedreht angeordnet werden. Der Drehwinkel zwischen zwei benachbarten Linsen kann dabei beispielsweise 45° betragen, so dass ein Lichtstrahl beispielsweise bei der einen Linse durch einen azimuthalen Winkelbereich mit maximaler intrinsischer Doppelbrechung und bei der nächsten Linse durch einen azimuthalen Winkelbereich mit minimaler intrinsischer Doppelbrechung tritt. Es ist auch möglich, die Drehwinkel dieser vier im Strahlengang zuletzt angeordneten Linsen so einzustellen, dass die azimuthalen Winkelbereiche mit maximaler intrinsischer Doppelbrechung jeweils um 22.5 Grad gedreht sind. Auch beliebige Drehwinkel sind möglich. Wichtig ist nur, dass der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung auf die Gesamtwellenfront minimal ist.

[0047] Durch das Design des Projektionsobjektives wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel aller Lichtstrahlen kleiner 45° ist. Der maximale Öffnungswinkel für den Randstrahl beträgt 39.4° bei der Linse L628. Hilfreich war der Einsatz von zwei dicken Planlinsen L629 und L630 unmittelbar vor der Bildebene.

[0048] Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L621 und L622 befindet, beträgt 270 mm. Der Durchmesser der Linse L618 beträgt 207 mm und die Durchmesser der Linsen L627 bis L630 sind alle kleiner 190 mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 80% des Blendendurchmessers.

[0049] In Fig. 7 ist der Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektives 711 für die Wellenlänge 157 nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP00/13184 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Fig. 9 beziehungsweise Tabelle 8. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektives wird auf die Patentanmeldung PCT/EP00/13184 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektives bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektives beträgt 0.8.

[0050] Für das Ausführungsbeispiel der Fig. 7 wurden die Öffnungswinkel  $\alpha$  des Randstrahls für die einzelnen optischen Elemente L801 bis L817 berechnet. Der Randstrahl geht dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten  $x = 0$  mm und  $y = 0$  mm aus und weist in der Bildebene einen Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welcher der bildseitigen numerischen Apertur entspricht. Es ist durchaus üblich, diesen theoretischen Strahl durchzurechnen, auch wenn er keinem physikalischen Lichtstrahl entspricht, da Objektive dieses Typs ein außeraxiales Feld aufweisen. Die Öffnungswinkel  $\alpha$  für den Randstrahl sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4

Linsen-Nr.	Öffnungswinkel $\alpha$ [°]	Linsen-Nr.	Öffnungswinkel $\alpha$ [°]
L801	5.5	L807	5.5
L802	15.5	L808	4.1
L803	20.5	L809	3.3
L803	21.5	L810	5.0
L802	16.4	L811	12.8
L804	6.3	L812	6.4
L805	8.3	L813	4.8
L806	4.3	L814	5.3
		L815	25.2
		L816	26.6
		L817	30.2

Tabelle 4

[0051] Tabelle 4 ist zu entnehmen, dass die Öffnungswinkel  $\theta$  für die Linsen L815 bis L817 größer als 25° sind. Mindestens bei diesen Linsen sollte deshalb die Elementachse in (100)-Kristallrichtung ausgerichtet sein. Auch in diesem Ausführungsbeispiel weisen die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L815 bis L817 große Öffnungswinkel auf. Damit sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung dieser drei Linsen nicht additiv überlagert, sollten diese drei Linsen gegeneinander um die optische Achse gedreht angeordnet werden. Der Drehwinkel zwischen zwei benachbarten Linsen kann dabei beispielsweise 45° betragen, so dass ein Lichtstrahl beispielsweise bei der einen Linse durch einen azimuthalen Winkelbereich mit maximaler intrinsischer Doppelbrechung und bei der nächsten Linse durch einen azimuthalen Winkelbereich mit minimaler intrinsischer Doppelbrechung tritt. Es ist auch möglich, die Drehwinkel dieser drei im Strahlengang zuletzt angeordneten Linsen so einzustellen, dass die azimuthalen Winkelbereiche mit maximaler intrinsischer Doppelbrechung jeweils um 30 Grad gedreht sind. Auch beliebige Drehwinkel sind möglich. Wichtig ist nur, dass der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung auf die Gesamtwellenfront minimal ist.

[0052] Durch das Design der Linsen L815 bis L817 wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel kleiner

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right) = \arcsin\left(\frac{0.8}{1.5597}\right) = 30.9^\circ$$

ist. Der maximale Öffnungswinkel für den Randstrahl beträgt 30.2° für die Linse L817.

[0053] Simulationen mit den in Fig. 4 und Fig. 5 gegebenen Modelldaten zur intrinsischen Doppelbrechung haben ergeben, daß für das Ausführungsbeispiel der Fig. 7 die intrinsische Doppelbrechung 16 nm beträgt, wenn bei allen Linsen die Elementachsen in (100)-Kristallrichtung zeigen und alle Linsen gleich orientiert eingebaut sind, also nicht gegeneinander gedreht sind. Durch geeignetes Drehen der Linsen kann die Doppelbrechung auf 8 nm reduziert werden. Baut man dagegen alle Linsen so ein, dass die Elementachsen in (111)-Kristallrichtung weisen, so beträgt die intrinsische Doppelbrechung 49 nm, wenn alle Linsen gleich orientiert sind. Durch geeignetes Drehen der Linsen kann die intrinsische Doppelbrechung auf 25 Nanometer reduziert werden. Das Ausführungsbeispiel zeigt, daß bei Projektionsobjektiven mit einer bildseitigen numerischen Apertur von größer als 0.8 die intrinsische Doppelbrechung um mehr als den Faktor drei reduziert werden kann, wenn die Elementachsen der Linsen nicht in (111)-Kristallrichtung, sondern in (100)-Kristallrichtung weisen.

[0054] Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L811 und L812 befindet, beträgt 193 mm. Die Durchmesser der Linsen L815 bis L817 sind alle kleiner als 162 mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 85% des Blendendurchmessers.

[0055] Anhand von Fig. 8 wird der prinzipielle Aufbau einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage beschrieben. Die Projektionsbelichtungsanlage 81 weist eine Beleuchtungseinrichtung 83 und Projektionsobjektiv 85 auf. Das Projektionsobjektiv 85 umfaßt eine Linsenanordnung 819 mit einer Aperturblende AP, wobei durch die Linsenanordnung 89 eine optische Achse 87 definiert wird. Ausführungsbeispiele für die Linsenanordnung 89 sind in Fig. 6 und Fig. 7 gegeben. Zwischen der Beleuchtungseinrichtung 83 und dem Projektionsobjektiv 85 ist eine Maske 89 angeordnet, die mittels eines Maskenhalters 811 im Strahlengang gehalten wird. Solche in der Mikrolithographie verwendeten Masken 89 weisen eine Mikrometer-Nanometer Struktur auf, die mittels des Projektionsobjektives 85 beispielsweise um den Faktor 4 oder 5 verkleinert auf eine Bildebene 813 abgebildet wird. In der Bildebene 813 wird ein durch einen Substrathalter 817 positioniertes lichtempfindliches Substrat 815, beziehungsweise ein Wafer, gehalten.

[0056] Die noch auflösbaren minimalen Strukturen hängen von der Wellenlänge  $\lambda$  des für die Beleuchtung verwendeten Lichtes sowie von der bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektives 85 ab, wobei die maximal erreichbare Auflösung der Projektionsbelichtungsanlage 81 mit abnehmender Wellenlänge  $\lambda$  der Beleuchtungseinrichtung 83 und mit zunehmender bildseitiger numerischer Apertur des Projektionsobjektives 85 steigt. Mit den in Fig. 6 und Fig. 7 gezeigten Ausführungsbeispielen lassen sich Auflösungen kleiner 150 nm realisieren. Deshalb müssen auch Effekte wie die intrinsische Doppelbrechung minimiert werden, auch wenn sie nur eine Verschlechterung der Wellenfront in der Größenordnung von 10 nm hervorrufen. Durch die Erfindung ist es gelungen, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung gerade bei Projektionsobjektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen stark zu reduzieren.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

## DE 101 23 727 A 1

TABELLE 1

M1587a

5	LINSEN	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157.629nm	1/2 FREIER DURCHMESSER
	0	0.000000000	27.171475840	N2	1.00031429	46.200
		0.000000000	0.602670797	N2	1.00031429	52.673
	L601	900.198243311AS	15.151284556	CaF2	1.55929035	53.454
10		-235.121108435	9.531971079	N2	1.00031429	54.049
	L602	-167.185917779	8.294716452	CaF2	1.55929035	54.178
		-132.673519510	14.020355779	N2	1.00031429	54.901
	L603	-333.194588652	9.893809820	CaF2	1.55929035	53.988
		-155.450516203	15.930502944	N2	1.00031429	54.132
	L604	-73.572316296	7.641977580	CaF2	1.55929035	53.748
15		-68.248613899AS	2.881720302	N2	1.00031429	55.167
	L605	-86.993585564AS	5.094651720	CaF2	1.55929035	52.580
		-238.150965327	5.379130780	N2	1.00031429	53.729
	L606	-165.613920870	5.094651720	CaF2	1.55929035	53.730
		153.417884485	34.150169591	N2	1.00031429	56.762
20	L607	-92.061009990	5.094651720	CaF2	1.55929035	58.081
		8491.086261873AS	19.673523795	N2	1.00031429	74.689
	L608	-407.131300451	30.380807138	CaF2	1.55929035	87.291
		-140.620317156	0.761662684	N2	1.00031429	91.858
	L609	-4831.804853654AS	50.269660218	CaF2	1.55929035	117.436
		-192.197373609	1.688916911	N2	1.00031429	121.408
25	L610	-367.718684892	21.227715500	CaF2	1.55929035	127.704
		-233.628547894	2.224071019	N2	1.00031429	129.305
	L611	709.585855080	28.736922725	CaF2	1.55929035	137.016
		1238.859445357	9.120684720	N2	1.00031429	137.428
	L612	1205.457051945	49.281218258	CaF2	1.55929035	138.288
30		-285.321880705	1.625271224	N2	1.00031429	138.379
	L613	137.549591710	56.718543740	CaF2	1.55929035	108.652
		-4380.301012978AS	0.623523902	N2	1.00031429	106.138
	L614	2663.880214408	6.792868960	CaF2	1.55929035	103.602
		149.184979730	15.779049257	N2	1.00031429	84.589
	L615	281.093108064	6.792868960	CaF2	1.55929035	83.373
35		184.030288413	32.341552355	N2	1.00031429	77.968
	L616	-222.157416308	5.094651720	CaF2	1.55929035	77.463
		101.254238115AS	56.792834221	N2	1.00031429	71.826
	L617	-106.980638018	5.094651720	CaF2	1.55929035	72.237
		1612.305471130	20.581065398	N2	1.00031429	89.760
40	L618	-415.596135628	26.3981111993	CaF2	1.55929035	96.803
		-204.680044631	0.713343960	N2	1.00031429	103.409
	L619	-646.696622394	25.867340760	CaF2	1.55929035	116.636
		-231.917626896	0.766268682	N2	1.00031429	118.569
	L620	-790.657607677	23.400482872	CaF2	1.55929035	128.806
		-294.872053725	0.721402031	N2	1.00031429	130.074
45	L621	786.625567756	40.932308205	CaF2	1.55929035	141.705
		-431.247283013	12.736629300	N2	1.00031429	142.089
		0.000000000	-8.491086200	N2	1.00031429	134.586
	L622	295.022653593AS	20.185109438	CaF2	1.55929035	139.341
		449.912291916	0.619840486	N2	1.00031429	137.916
50	L623	358.934076212	48.662890509	CaF2	1.55929035	136.936
		-622.662988878	30.955714157	N2	1.00031429	135.288
	L624	-224.404889753	12.736629300	CaF2	1.55929035	134.760
		-251.154571510AS	16.079850229	N2	1.00031429	134.853
	L625	-193.582989843AS	16.510083506	CaF2	1.55929035	134.101
		-198.077570749	0.880353872	N2	1.00031429	136.109
55	L626	206.241795157	19.927993542	CaF2	1.55929035	101.240
		338.140581666	0.925956949	N2	1.00031429	97.594
	L627	111.017549581	24.580089962	CaF2	1.55929035	85.023
		169.576109839	0.777849447	N2	1.00031429	81.164
	L628	117.982165264	31.161065630	CaF2	1.55929035	75.464
		921.219058213AS	6.934980174	N2	1.00031429	69.501
60	L629	0.000000000	22.260797322	CaF2	1.55929035	63.637
		0.000000000	4.245543100	N2	1.00031429	48.606
	L630	0.000000000	21.227715500	CaF2	1.55929035	41.032

# DE 101 23 727 A 1

0.000000000 8.491086200 N2 1.00031429 26.698  
 0.000000000 0.000000000 1.000000000 11.550  
 Wellenlänge und Brechzahl sind gegenüber Vakuum angegeben.

## ASPHAERISCHE KONSTANTEN

### Asphäre der Linse L601

K 0.0000  
 C1 1.28594437e-007  
 C2 8.50731836e-013  
 C3 1.16375620e-016  
 C4 2.28674275e-019  
 C5 -1.23202729e-022  
 C6 3.32056239e-026  
 C7 -4.28323389e-030  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

### Asphäre der Linse L604

K -1.3312  
 C1 -4.03355456e-007  
 C2 2.25776586e-011  
 C3 -2.19259878e-014  
 C4 4.32573397e-018  
 C5 -7.92477159e-022  
 C6 7.57618874e-026  
 C7 -7.14962797e-030  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

### Asphäre der Linse L605

K -1.1417  
 C1 1.33637337e-007  
 C2 1.56787758e-011  
 C3 -1.64362484e-014  
 C4 3.59793786e-018  
 C5 -5.11312568e-022  
 C6 1.70636633e-026  
 C7 1.82384731e-030  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

### Asphäre der Linse L607

K 0.0000  
 C1 1.34745120e-007  
 C2 -2.19807543e-011  
 C3 1.20275881e-015  
 C4 4.39597377e-020  
 C5 -2.37132819e-023  
 C6 2.87510939e-027  
 C7 -1.42065162e-031  
 C8 0.00000000e+000

C9 0.00000000e+000  
Asphäre der Linse L609

5 K 0.0000  
C1 6.85760526e-009  
C2 -4.84524868e-013  
C3 -6.28751350e-018  
C4 -3.72607209e-022  
C5 3.25276841e-026  
10 C6 -4.05509974e-033  
C7 -3.98843079e-035  
C8 0.00000000e+000  
C9 0.00000000e+000

15  
Asphäre der Linse L613

K 0.0000  
C1 2.24737416e-008  
20 C2 -4.45043770e-013  
C3 -4.10272049e-017  
C4 4.31632628e-021  
C5 -3.27538237e-025  
C6 1.44053025e-029  
25 C7 -2.76858490e-034  
C8 0.00000000e+000  
C9 0.00000000e+000

30 Asphäre der Linse L616

K 0.0000  
C1 -2.83553693e-008  
C2 -1.12122261e-011  
35 C3 -2.05192812e-016  
C4 -1.55525080e-020  
C5 -4.77093112e-024  
C6 8.39331135e-028  
C7 -8.97313681e-032  
40 C8 0.00000000e+000  
C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L622

45 K 0.0421  
C1 7.07310826e-010  
C2 -2.00157185e-014  
C3 -9.33825109e-020  
C4 1.27125854e-024  
50 C5 1.94008709e-027  
C6 -6.11989858e-032  
C7 2.92367322e-036  
C8 0.00000000e+000  
55 C9 0.00000000e+000

60

65

## Asphäre der Linse L624

K 0.0000  
 C1 3.02835805e-010  
 C2 -2.40484062e-014  
 C3 -3.22339189e-019  
 C4 1.64516979e-022  
 C5 -8.51268614e-027  
 C6 2.09276792e-031  
 C7 -4.74605669e-036  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

5

10

## Asphäre der Linse L625

K 0.0000  
 C1 -3.99248993e-010  
 C2 5.79276562e-014  
 C3 3.53241478e-018  
 C4 -4.57872308e-023  
 C5 -6.29695208e-027  
 C6 1.57844931e-031  
 C7 -2.19266130e-036  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

15

20

25

## Asphäre der Linse L628

K 0.0000  
 C1 4.40737732e-008  
 C2 1.52385268e-012  
 C3 -5.44510329e-016  
 C4 6.32549789e-020  
 C5 -4.58358203e-024  
 C6 1.92230388e-028  
 C7 -3.11311258e-033  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

30

35

40

45

50

55

60

65

## DE 101 23 727 A 1

Tabelle 3

L61					
	LINSEN	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157.13 nm
5	0	0.000000000	34.000000000		1.000000000
		0.000000000	0.100000000		1.000000000
	L801	276.724757380	40.000000000	CaF2	1.55970990
		1413.944109416AS	95.000000000		1.000000000
10	SP1	0.000000000	11.000000000		1.000000000
		0.000000000	433.237005445		1.000000000
	L802	-195.924336384	17.295305525	CaF2	1.55970990
		-467.658808527	40.841112468		1.000000000
	L803	-241.385736441	15.977235467	CaF2	1.55970990
		-857.211727400AS	21.649331094		1.000000000
15	SP2	0.000000000	0.000010000		1.000000000
		253.074839896	21.649331094		1.000000000
	L803'	857.211727400AS	15.977235467	CaF2	1.55970990
		241.385736441	40.841112468		1.000000000
	L802'	467.658808527	17.295305525	CaF2	1.55970990
		195.924336384	419.981357165		1.000000000
20	SP3	0.000000000	6.255658280		1.000000000
		0.000000000	42.609155219		1.000000000
	Z1	0.000000000	67.449547115		1.000000000
	L804	432.544479547	37.784311058	CaF2	1.55970990
		-522.188532471	113.756133662		1.000000000
25	L805	-263.167605725	33.768525968	CaF2	1.55970990
		-291.940616829AS	14.536591424		1.000000000
	L806	589.642961222AS	20.449887046	CaF2	1.55970990
		-5539.698828792	443.944079795		1.000000000
	L807	221.780582003	9.000000000	CaF2	1.55970990
		153.071443064	22.790060084		1.000000000
30	L808	309.446967518	38.542735318	CaF2	1.55970990
		-2660.227900099	0.100022286		1.000000000
	L809	23655.354584194	12.899131182	CaF2	1.55970990
		-1473.189213176	9.318886362		1.000000000
	L810	-652.136459374	16.359499814	CaF2	1.55970990
		-446.489459129	0.100000000		1.000000000
35	L811	174.593507050	25.900313780	CaF2	1.55970990
		392.239615259AS	14.064505431		1.000000000
		0.000000000	2.045119392		1.000000000
	L812	7497.306838492	16.759051656	CaF2	1.55970990
		318.210831711	8.891640764		1.000000000
40	L813	428.724465129	41.295806263	CaF2	1.55970990
		3290.097860119AS	7.377912006		1.000000000
	L814	721.012739719	33.927118706	CaF2	1.55970990
		-272.650872353	6.871397517		1.000000000
	L815	131.257556743	38.826450065	CaF2	1.55970990
		632.112566477AS	4.409527396		1.000000000
45	L816	342.127616157AS	37.346293509	CaF2	1.55970990
		449.261078744	4.859754445		1.000000000
	L817	144.034814702	34.792179308	CaF2	1.55970990
		-751.263321098AS	11.999872684		1.000000000
	0'	0.000000000	0.000127776		1.000000000
50					16.430

55

60

65

## ASPHAERISCHE KONSTANTEN

## Asphäre der Linse L801

K	0.0000	5
C1	4.90231706e-009	
C2	3.08634889e-014	
C3	-9.53005325e-019	
C4	-6.06316417e-024	10
C5	6.11462814e-028	
C6	-8.64346302e-032	
C7	0.00000000e+000	
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	15

## Asphäre der Linse L803

K	0.0000	20
C1	-5.33460884e-009	
C2	9.73867225e-014	
C3	-3.28422058e-018	
C4	1.50550421e-022	
C5	0.00000000e+000	25
C6	0.00000000e+000	
C7	0.00000000e+000	
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	30

## Asphäre der Linse L803`

K	0.0000	
C1	5.33460884e-009	35
C2	-9.73867225e-014	
C3	3.28422058e-018	
C4	-1.50550421e-022	
C5	0.00000000e+000	
C6	0.00000000e+000	
C7	0.00000000e+000	40
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	

## Asphäre der Linse L805

K	0.0000	45
C1	2.42569449e-009	
C2	3.96137865e-014	
C3	-2.47855149e-018	50
C4	7.95092779e-023	
C5	0.00000000e+000	
C6	0.00000000e+000	
C7	0.00000000e+000	
C8	0.00000000e+000	55
C9	0.00000000e+000	

60

65

## Asphäre der Linse L806

K 0.0000  
 5 C1 -6.74111232e-009  
 C2 -2.57289693e-014  
 C3 -2.81309020e-018  
 C4 6.70057831e-023  
 C5 5.06272344e-028  
 10 C6 -4.81282974e-032  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

## 15 Asphäre der Linse L811

K 0.0000  
 C1 2.28889624e-008  
 20 C2 -1.88390559e-014  
 C3 2.86010656e-017  
 C4 -3.18575336e-021  
 C5 1.45886017e-025  
 C6 -1.08492931e-029  
 C7 0.00000000e+000  
 25 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L813

30 K 0.0000  
 C1 3.40212872e-008  
 C2 -1.08008877e-012  
 C3 4.33814531e-017  
 35 C4 -7.40125614e-021  
 C5 5.66856812e-025  
 C6 0.00000000e+000  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 40 C9 0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L815

45 K 0.0000  
 C1 -3.15395039e-008  
 C2 4.30010133e-012  
 C3 3.11663337e-016  
 C4 -3.64089769e-020  
 C5 1.06073268e-024  
 50 C6 0.00000000e+000  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

55

60

65

## Asphäre der Linse L816

K	0.0000
C1	-2.16574623e-008
C2	-6.67182801e-013
C3	4.46519932e-016
C4	-3.71571535e-020
C5	0.00000000e+000
C6	0.00000000e+000
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

5

10

## Asphäre der Linse L817

K	0.0000
C1	2.15121397e-008
C2	-1.65301726e-011
C3	-5.03883747e-015
C4	1.03441815e-017
C5	-6.29122773e-021
C6	1.44097714e-024
C7	0.00000000e+000
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

15

20

25

## Patentansprüche

30

1. Optisches Element (1, 201, L627-L630, L815-L817) aus einem Fluorid-Kristall, insbesondere für ein Projektionsobjektiv einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei das optische Element eine Elementachse (EA) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Elementachse annähernd senkrecht auf den (100)-Kristallebenen oder auf den (010)-Kristallebenen oder auf den (001)-Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht.

35

2. Optisches Element (1, 201, L627-L630, L815-L817) nach Anspruch 1, wobei das optische Element eine rotationssymmetrische Linse mit einer Symmetrieachse ist und die Symmetrieachse mit der Elementachse des optischen Elements zusammenfällt.

3. Optisches Element (1, 201, L627-L630, L815-L817) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei der Fluorid Kristall ein Kalzium-Fluorid-Kristall, ein Strontium-Fluorid oder ein Barium-Fluorid-Kristall ist.

4. Projektionsobjektiv (611, 711, 85) für eine Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer Mehrzahl von optischen Elementen (L601-L630, L801-L817), wobei mindestens ein ausgezeichnetes optisches Element (201, L627-L630, L815-L817) ein optisches Element nach einem der Ansprüche 1 bis 3 ist.

40

5. Projektionsobjektiv (611, 711, 85) nach Anspruch 4 mit einer optischen Achse (OA), wobei die Elementachse des ausgezeichneten optischen Elements mit der optischen Achse des Projektionsobjektivs zusammenfällt.

6. Projektionsobjektiv nach Anspruch 4 oder 5, wobei das Projektionsobjektiv eine bildseitige numerische Apertur NA aufweist und die bildseitige numerische Apertur NA größer als 0,75, insbesondere größer als 0,85 ist.

45

7. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 6, wobei innerhalb des Projektionsobjektivs Lichtstrahlen von einer Objektebene (O) zu einer Bildebene (O') verlaufen und mindestens ein Lichtstrahl (609) innerhalb des ausgezeichneten optischen Elements einen Strahlwinkel bezüglich der Elementachse aufweist, der größer als 25°, insbesondere größer als 30° ist.

50

8. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 7, wobei innerhalb des Projektionsobjektivs Lichtstrahlen von einer Objektebene zu einer Bildebene verlaufen und alle Lichtstrahlen innerhalb des ausgezeichneten optischen Elements Strahlwinkel bezüglich der Elementachse aufweisen, die maximal 45°, insbesondere maximal

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

55

betragen, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und  $n_{FK}$  die Brechzahl des Fluorid-Kristalls.

9. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 8 mit einer Blendenebene, wobei die Blendenebene einen Blendendurchmesser aufweist und wobei das ausgezeichnete optische Element einen Elementdurchmesser aufweist und wobei der Elementdurchmesser kleiner als 85%, insbesondere kleiner als 80% des Blendendurchmessers ist.

60

10. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 9, wobei das ausgezeichnete optische Element (L630, L817) das der Bildebene nächste optische Element ist.

11. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 10, wobei das Projektionsobjektiv mindestens ein erstes ausgezeichnetes optisches Element (L629, L816) und ein zweites ausgezeichnetes optisches Element (L630, L817) umfaßt, und das erste ausgezeichnete optische Element gegenüber dem zweiten ausgezeichneten optischen Elements um die optische Achse mit einem Drehwinkel verdreht angeordnet ist, um den Einfluss der Doppelbrechung

65

zu minimieren.

12. Projektionsobjektiv nach Anspruch 11, wobei der Drehwinkel zwischen dem ersten ausgezeichneten optischen Element und dem zweiten ausgezeichneten optischen Elements annähernd  $45^\circ$  beträgt.

13. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 11 und 12, wobei das erste ausgezeichnete optische Element und das zweite ausgezeichnete optische Element benachbart angeordnet sind.

14. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 13, wobei die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200 nm aufweisen.

15. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 14, wobei die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 160 nm aufweisen.

16. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 15, wobei das Projektionsobjektiv (611) ein refraktives Objektiv mit Linsen ist.

17. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 15, wobei das Projektionsobjektiv ein katadioptrisches Objektiv (711) mit Linsen und mindestens einem Konkavspiegel (Sp2) ist.

18. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 17, wobei alle refraktiven optischen Elemente aus Kalzium-Fluorid sind.

19. Projektionsobjektiv für eine Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer optischen Achse, welches eine Mehrzahl von optischen Elementen aus einem Fluorid-Kristall umfasst, wobei die optischen Elemente Elementachsen aufweisen, welche zentriert zur optischen Achse angeordnet sind, und wobei die optischen Elemente abhängig von der Kristallstruktur azimuthale Winkelbereiche erhöhter Doppelbrechung aufweisen, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens zwei optische Elemente gegeneinander um die optische Achse verdreht angeordnet sind, um den Einfluß der Doppelbrechung zu minimieren.

20. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), umfassend

– ein Beleuchtungssystem (83),

– ein Projektionsobjektiv (85) nach einem der Ansprüche 1 bis 19, das eine Struktur tragende Maske (89) auf ein lichtempfindliches Substrat (815) abbildet.

21. Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Bauelementen mit einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81) nach Anspruch 20.

---

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

---

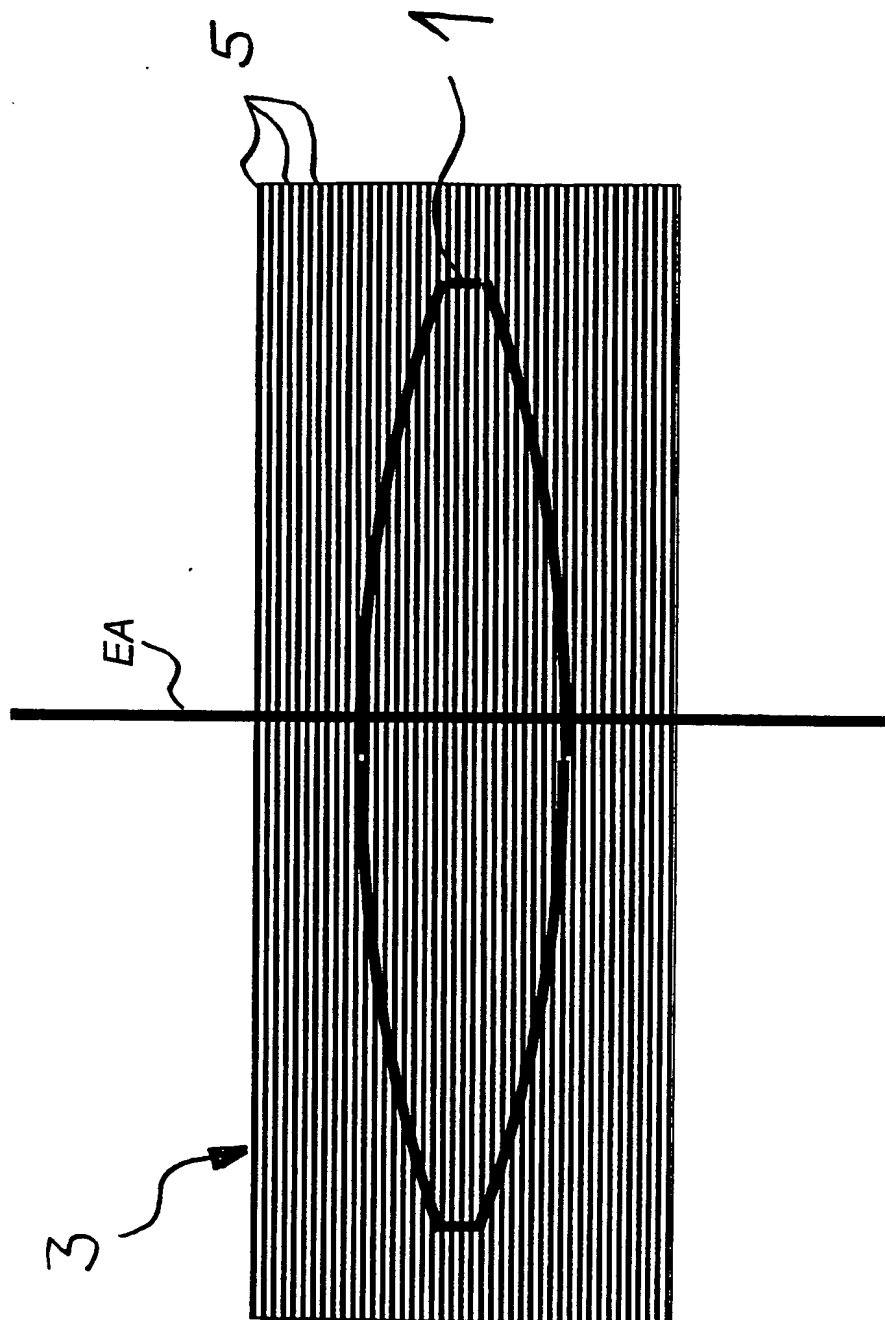
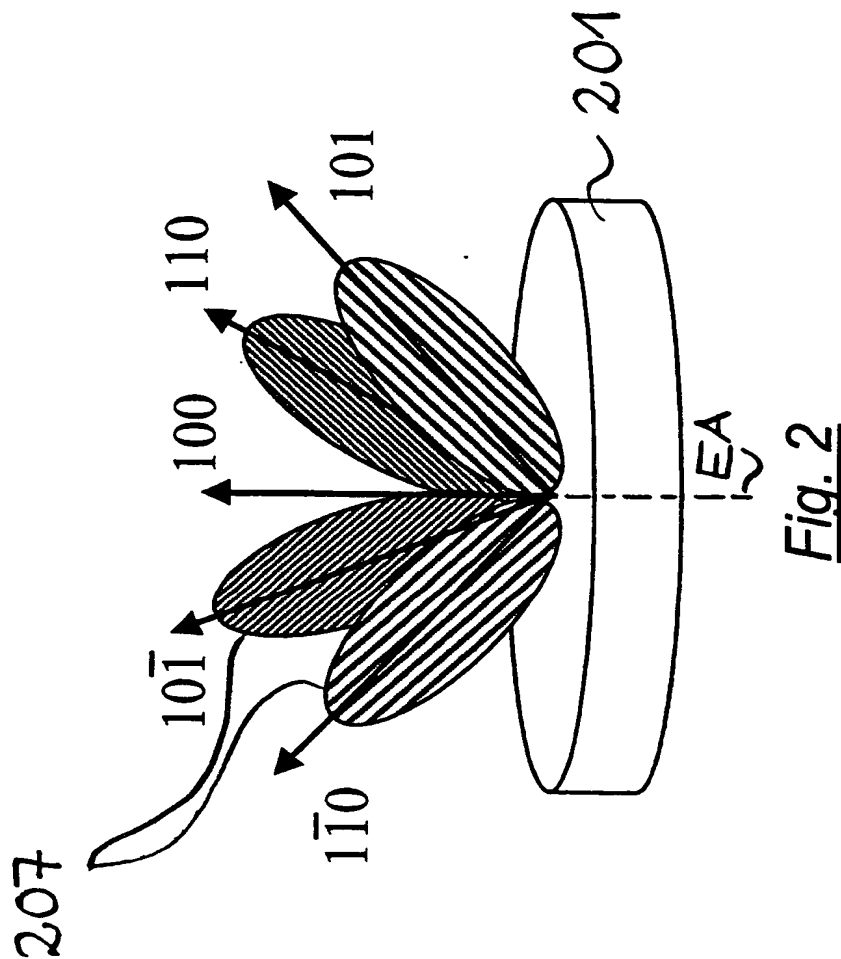


Fig. 1



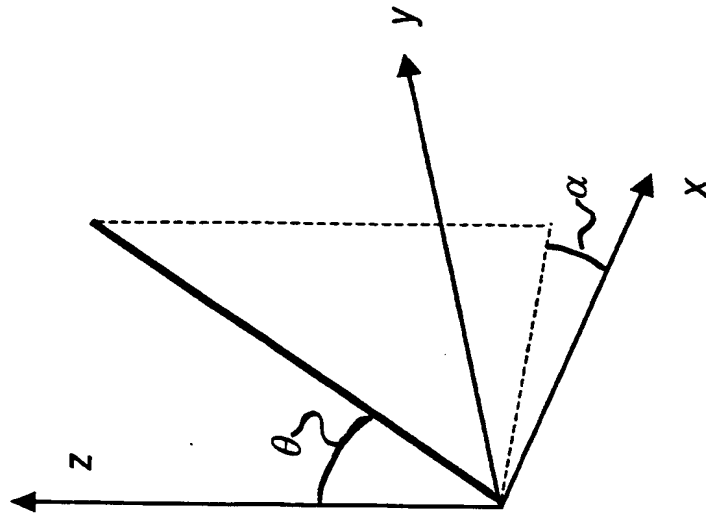


Fig. 3

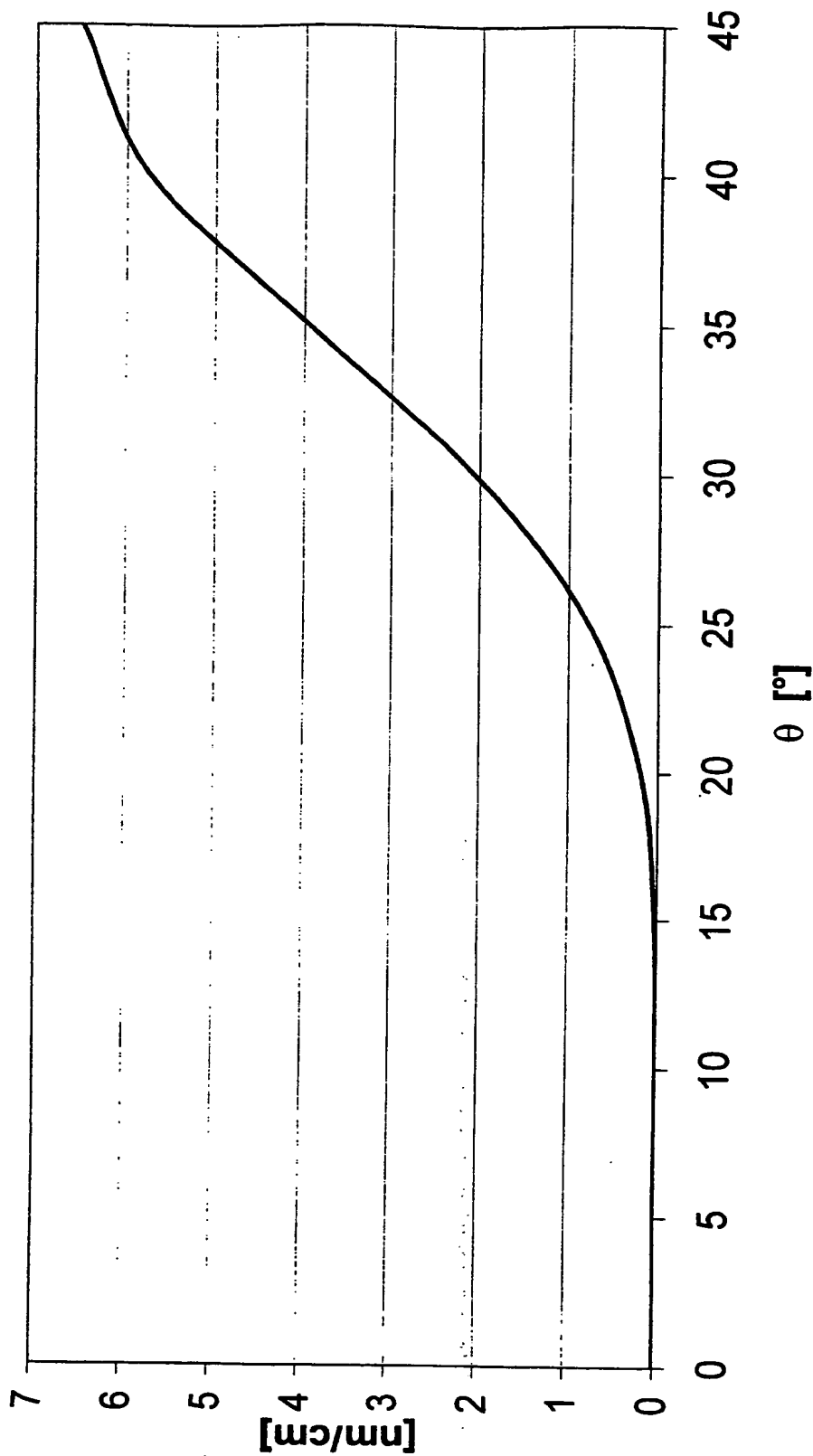


Fig. 4

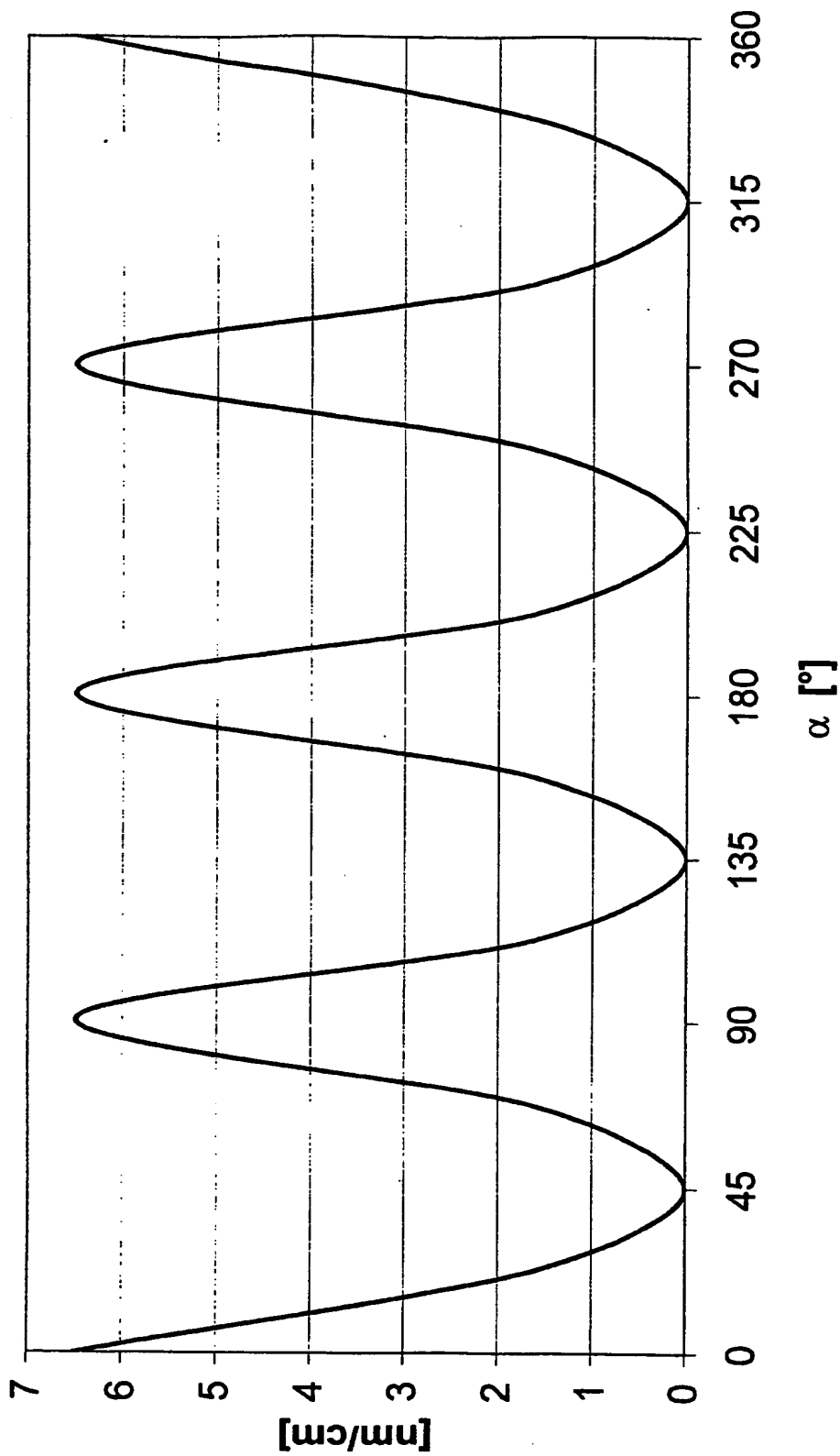


Fig. 5

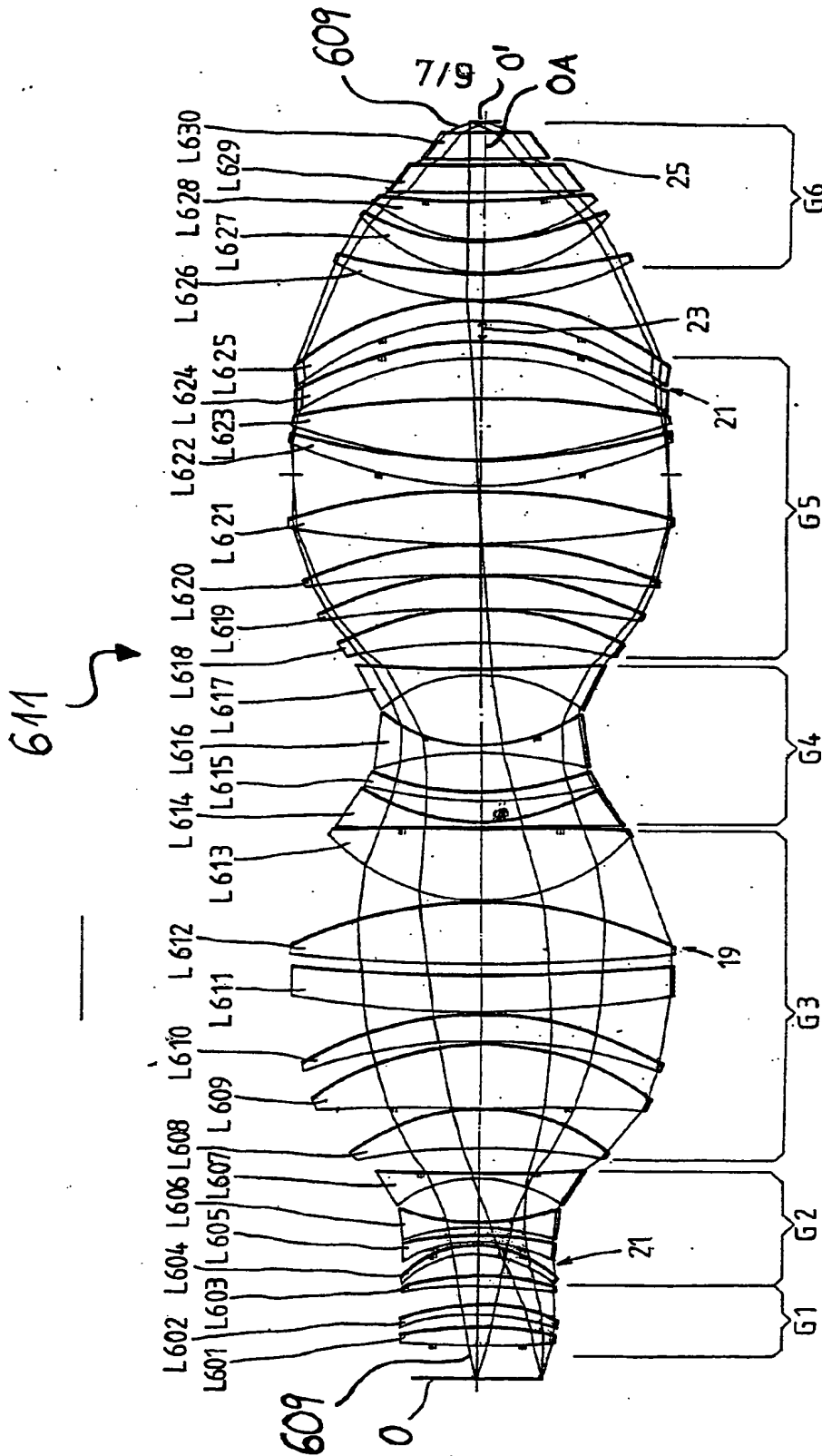


Fig. 6

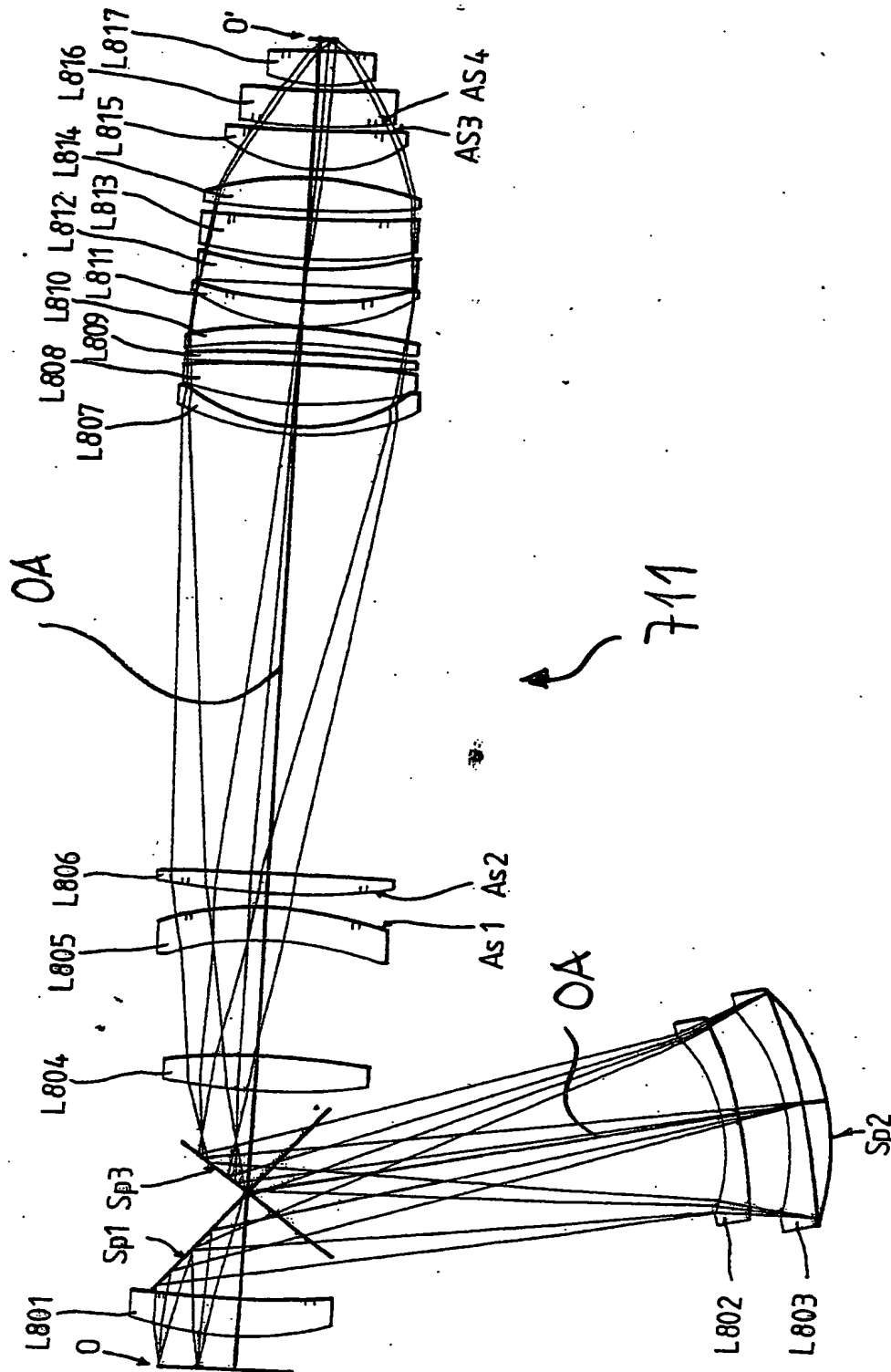


Fig. 7

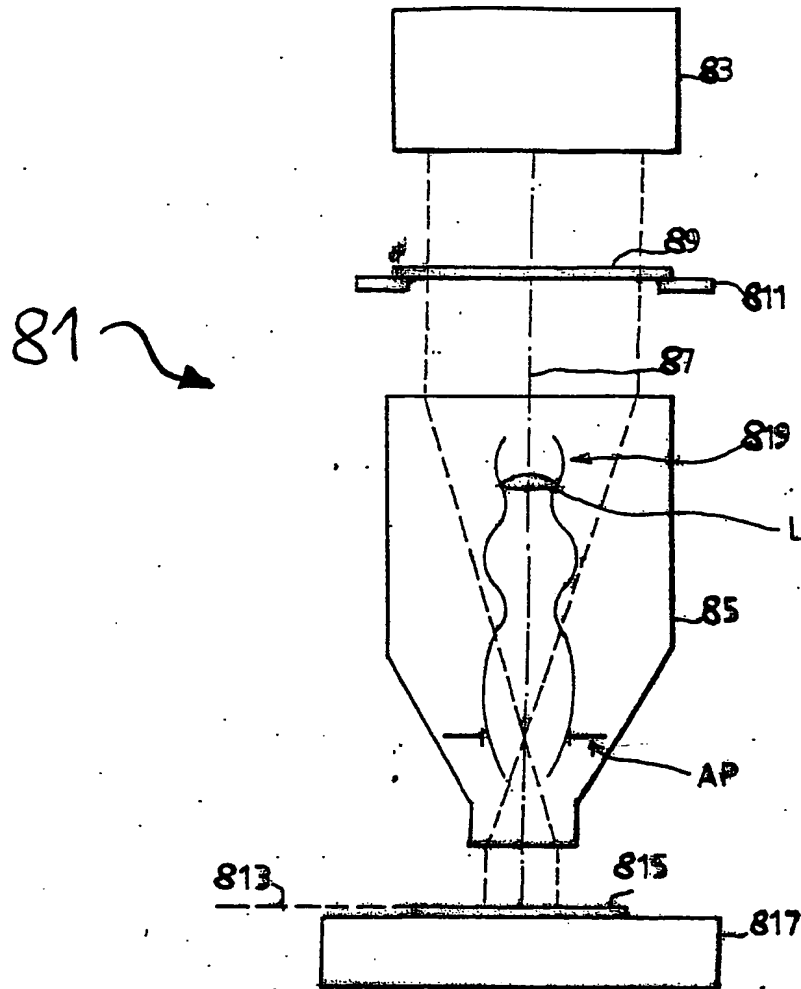


Fig. 8

(51)

[barcode]  
Int.Cl.<sup>7</sup>:  
G 02 B 1/02  
G 02 F 1/100  
G 03 F 7/20

(19) **Federal Republic of Germany**  
[emblem]  
**German Patent and Trademark Office**

DE 101 23 727 A1

(12) **Offenlegungsschrift**  
[Laid Open Print]

(10) **DE 101 23 727 A.1**

(21) Application number: 101 23 727.8  
(22) Application date: May 15, 2001  
(43) Disclosure date: November 21, 2002

---

(71) Applicant: Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE  
(72) Inventor: Brunotte, Martin, 73431 Aalen, DE;  
Wagner, Christian, 73430 Aalen, DE;  
Kaiser, Winfried, 73431 Aalen, DE.

---

The following information is derived from the documents submitted by the applicant.

(54) Title: Optical Element, Projection Lens and Microlithography -  
Projection Exposure System with Fluoride Crystal Lenses

(57) Optical element (1) made of a fluoride crystal, in particular for a projection lens of a microlithography - projection exposure system, whereby the optical element exhibits an element axis (EA), which is approximately perpendicular to the (100) crystal planes or the (010) crystal planes or the (001) crystal planes of the fluoride crystal. Such optical elements are used in projection lenses for a microlithography - projection exposure system. To further reduce the disturbing effect of birefringence, the optical element made of a fluoride crystal is arranged so as to rotate in opposite directions about the optical axis.

[see figure]

DE 101 23 727 A1

Specification

[0001]The invention relates to an optical element, as claimed in the preamble of claim 1.

[0002]Such optical elements are known from the US 6,201,634, where it is disclosed that in the manufacture of the optical elements the element axes of the optical elements are oriented ideally perpendicularly to the (111) crystal planes of the fluoride crystals, in order to minimize the stress induced birefringence. In so doing, the US 6,201,634 assumes that fluoride crystals do not have any intrinsic birefringence.

[0003]However, the Internet publication "Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in CaF<sub>2</sub>" by John H. Burnett, Eric L. Shirley, and Zachary H. Levine, NIST Gaithersburg, MD 20899 USA (published on May 7, 2001), discloses that calcium fluoride single crystals do, in fact, exhibit stress-induced, thus intrinsic birefringence. The measurements, presented in said article, show that for a beam propagation in the (110) crystal direction, a birefringence of  $(6.5 \pm 0.4)$  nm / cm occurs at a wavelength of  $\lambda = 156.1$  nm, a birefringence of  $(3.6 \pm 0.2)$  nm / cm occurs at a wavelength of  $\lambda = 193.09$  nm, a birefringence of  $(1.2 \pm 0.1)$  nm / cm occurs at a wavelength of  $\lambda = 253.65$  nm for calcium fluoride. In contrast, for a beam propagation in the (100) crystal direction and in the (111) crystal direction calcium fluoride exhibits no intrinsic birefringence, as also predicted by the theory. Thus, the intrinsic birefringence is highly direction-dependent and increases significantly as the wavelength becomes shorter.

[0004]Due to the symmetry properties of cubic crystals, the statements on the beam propagation in the (110) crystal direction in the following presentation also hold true for the beam propagation in the (101) crystal direction or in the (011) crystal direction. The same also applies to statements about the beam propagation in the (100) crystal direction, the (010) crystal direction, and the (001) crystal direction. In this respect the crystal direction always indicates the direction of the surface normals to the corresponding plane of the crystal. Thus, the crystal direction (100) points in the direction of the surface normals of the crystal plane (100). Therefore, there are explicitly no

detailed statements about the corresponding crystal directions, based on the crystal symmetry, or about the crystal planes, resulting from the permutations of the numbers "0" and "1", but rather are to be implicitly inferred when findings are made about one of these crystal directions or crystal planes.

[0005] Projection lenses and microlithography - projection exposure systems are known, for example, from the patent application PCT / EP 00 / 13184 of the applicant and the documents cited therein. The embodiments of this application show appropriate, purely refractive and catadioptric projection lenses with numerical apertures of 0.8 and 0.9, at an operating wavelength of 193 nm and 157 nm.

[0006] The object of the invention is to provide optical elements for a projection lens as well as projection lenses for a microlithography - projection exposure system, where the effect of the intrinsic birefringence is minimized.

[0007] This problem is solved with an optical element, according to claim 1, a projection lens, according to claim 4 and claim 19, a microlithography - projection exposure system, according to claim 20, and a process for manufacturing semiconductor components, according to claim 21. Advantageous designs of the invention follow from the features of the dependent claims.

[0008] To minimize the effect of the intrinsic birefringence, claim 1 proposes that in the case of optical elements made of a fluoride crystal the element axes be oriented in such a manner that they coincide with the (100) crystal direction as far as up to a maximum deviation of 5°. In so doing, the element axis is given, for example, by an axis of symmetry of the optical element, or in the case of irradiation of the optical element by the center of the cone of incident rays or by a straight line, with respect to which the angles of all of the rays of light inside the optical element are minimal. Examples of optical elements are refractive or diffractive lenses as well as corrector plates with free form corrector surfaces. The orientation of the element axis in the (100) crystal direction has the advantage that the disturbing effect of the intrinsic birefringence, which is the result of the light propagation in the (110) crystal direction, is not noticeable until at very high aperture angles of the light rays. The aperture angle is defined in this context as the angle between

a light ray and the element axis inside the optical element. Not until the aperture angles move into the area of the angle between the (100) crystal direction and the (110) crystal direction do the corresponding light rays feel the effect of the birefringence. In this respect the angle between the (110) crystal direction and the (100) crystal direction amounts to  $45^\circ$ . If, in contrast, the element axis were oriented in the (111) crystal direction, then the disturbing effect of the intrinsic birefringence would be observed even at smaller aperture angles, because the angle between the (110) crystal direction and the (111) crystal direction is only  $35^\circ$ .

[0009] If the birefringence's dependency on the angle is induced, for example, during the manufacturing process of the fluoride crystal or the mechanical strain of the optical element, then the disclosed proposed solutions can be used, of course, to reduce the disturbing effect of the birefringence.

[0010] Preferably the optical elements are rotationally symmetrical lenses. In this case the axis of symmetry of the lenses coincides with the element axis of the optical elements.

[0011] Preferably calcium fluoride is used as the material for the optical elements in the projection lenses, because calcium fluoride used together with quartz is especially suitable at a working wavelength of 193 nm for chromatic correction; or at a working wavelength of 157 nm it provides adequate transmission. However, the statements made here apply even to the fluoride crystals strontium fluoride or barium fluoride, because they are crystals of the same cubic crystal type.

[0012] According to claim 4, the optical elements, wherein the element axes are approximately perpendicular to the (100) crystal planes, are used preferably in projection lenses of a microlithography - projection exposure system. In this case not all of the optical elements of the projection lens have to exhibit such an orientation of the crystal planes. Those optical elements, wherein the element axes are perpendicular to the (100) crystal planes, are also referred to below as excellent optical elements.

[0013] Projection lenses exhibit an optical axis that runs from the object plane to the image plane. Preferably the optical elements are centered about this optical axis so that the element axes also coincide with the optical axis.

[0014] The disturbing effect of the intrinsic birefringence is especially noticeable when the light rays inside the optical elements exhibit large aperture angles. This is the case for projection lenses that exhibit an image-sided numerical aperture that is larger than 0.75, in particular larger than 0.85.

[0015] For projection lenses with such large numerical apertures, the aperture angles inside the excellent optical elements are larger than 25°, in particular larger than 30°. Precisely in the case of these large aperture angles the invention comes across, to orient the element axes in the (100) crystal direction. If the element axes were oriented in the (111) crystal direction, the light rays having aperture angles greater than 25°, in particular greater than 30°, would clearly perceive the disturbing effect of the birefringence, which for aperture angles of 34° is maximal.

[0016] Since, on the other hand, the disturbing effect of the intrinsic birefringence can be maximal at an aperture angle of 45°, it is advantageous to design the projection lens so that all aperture angles of the light rays are smaller than 45°, in particular are smaller or equal to

$$\arcsin (NA/n_{FK}),$$

where NA denotes the image-sided numerical aperture; and  $n_{FK}$  denotes the refractive index of the fluoride crystal. This is achieved in that the lenses that are arranged near the image plane exhibit collecting lens surfaces or very readily dispersing lens surfaces.

[0017] Predominantly in the case of optical elements large aperture angles occur in the vicinity of the field planes, in particular the image plane. Therefore, the excellent optical elements should be used preferably in the area of the field planes. The area, in which the excellent optical elements should be used, can be determined by means of the ratio of the diameter of the element to the diameter of the stop. Thus, the element diameter of the excellent optical

element is preferably maximally 85%, in particular maximally 80% of the diameter of the stop.

[0018] In the case of projection lenses with an image-sided numerical aperture greater than 0.75, the largest aperture angles usually occur in the optical element, located the closest to the image plane. Therefore, for this optical element the element axis is oriented in the direction of the (100) crystal direction.

[0019] In so doing, the intrinsic birefringence is not only a function of the aperture angle of a light ray, but also the azimuth angle of the light ray about the element axis. The azimuth angle of a light ray is determined as follows. If the element axis is oriented, for example, in the (100) crystal direction, the light ray is projected into the (100) crystal plane. Similarly the direction vectors of the (101), (110), (101) and (110) crystal directions with maximum intrinsic birefringence project into the (100) crystal plane. At this stage the azimuth angle is determined between the projected light ray and the projected direction vector of the (101) crystal direction. Naturally the corresponding definitions also apply to those cases, wherein the element axis is oriented in the (010) crystal direction or in the (001) crystal direction. Thus, the intrinsic birefringence exhibits a four digit symmetry, when the element axis is oriented in the (100) crystal direction. The result is a maximum intrinsic birefringence for azimuth angles of  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  and  $270^\circ$ , whereas it virtually disappears for angles of  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  and  $315^\circ$ . If several excellent optical elements are used in a projection lens, it is advantageous for the excellent elements to rotate about the optical axis in opposite directions. Thus, the disturbing effect of the intrinsic birefringence superimposing itself additively can be prevented.

[0020] If, for example, two excellent optical elements are used, it is advantageous for the angle of rotation between the optical elements to be approximately  $45^\circ$ .

[0021] The rotation of the individual excellent optical elements in opposite directions becomes especially effective when the excellent optical elements are arranged adjacent.

[0022]The intrinsic birefringence increases significantly as the working wavelength decreases. Thus, at a wavelength of 193 nm the intrinsic birefringence is more than twice as large; at a wavelength of 157 nm it is more than five times as large as at a wavelength of 248 nm. Therefore, the invention can be used especially advantageously when the light rays exhibit wavelengths of less than 200 nm, in particular less than 160 nm.

[0023]The projection lens can be a purely refractive lens that consists of a plurality of lenses that are arranged rotationally symmetrically about the optical axis.

[0024]However, even for projection lenses of the catadioptric lens type, the image formation efficiency is improved when the lenses with large aperture angles of the light rays are oriented in such a manner that the axes of symmetry of the lenses point in the (100) crystal direction.

[0025]Since the effect of the intrinsic birefringence is a function of the azimuth angle of a light ray, the imaging performance of a projection lens can be increased by arranging the optical elements so that they rotate about the optical axis in opposite directions. In this respect the rotation relates to the crystal structure of the individual optical elements. Thus, a light ray on its path from the object plane to the image plane should make only limited contact with the azimuth angular ranges with increased intrinsic birefringence. The azimuth angular ranges with increased intrinsic birefringence are specified by the (110) crystal direction or the crystal directions, in which the numbers "1", "1" and "0" are permuted.

[0026]Such projection lenses can be used advantageously in microlithography - projection exposure systems that starting from the light source comprise a mask - positioning system, a structure-carrying mask, a projection lens, an object positioning system and a light sensitive substrate.

[0027]Micro-structured semiconductor components can be manufactured with this microlithography - projection exposure system.

[0028]The invention is explained in detail with reference to the drawings.

[0029] Figure 1 is a sectional view of schematic drawing of a fluoride crystal block perpendicular to the (100) crystal planes together with an inventive optical element.

[0030] Figure 2 is schematic three dimensional drawing of an optical element of the invention.

[0031] Figure 3 depicts a coordinate system for defining the aperture angle and the azimuth angle.

[0032] Figure 4 depicts the curve of the intrinsic birefringence as a function of the aperture angle  $\theta$ .

[0033] Figure 5 depicts the curve of the intrinsic birefringence as a function of the azimuth angle  $\alpha$ .

[0034] Figure 6 is a sectional view of the lens of a refractive projection lens.

[0035] Figure 7 is a sectional view of the lens of a catadioptric projection lens; and

[0036] Figure 8 is a schematic drawing of a microlithography - projection exposure system.

[0037] Figure 1 is a schematic drawing of a sectional view of a fluoride crystal block 3. The sectional view is chosen in such a manner that the (100) crystal planes 5 can be seen as individual lines so that the (100) crystal planes 5 are perpendicular to the plane of the paper. The fluoride crystal block 3 serves as the starting material for the optical element 1. In this example, the optical element 1 is a biconvex lens with the element axis EA, which is simultaneously the lens' axis of symmetry. At this stage the optical element 1 is cut out of the fluoride crystal block in such a manner that the element axis EA is perpendicular to the (100) planes of the crystal.

[0038] Figure 2 illustrates once again with a three dimensional drawing why it is especially advantageous to orient the element axis EA of the optical elements in the (100) crystal direction. The figure depicts a circular plane-

parallel plate 201 made of calcium fluoride as the optical element. The element axis EA points in the (100) crystal direction. Besides the (100) crystal direction, the (101), (110), (101) and (110) crystal directions are also shown as arrows. The intrinsic birefringence is depicted schematically by four "clubs" 207, the upper surfaces of which indicate the amount of the intrinsic birefringence for the respective direction of a ray of light.

[0039] The maximum intrinsic birefringence arises in the (101), (110), (101) and (110) crystal directions respectively, thus for light rays with an aperture angle of  $45^\circ$  and an azimuth angle of  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  and  $270^\circ$ . For azimuth angles of  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  and  $315^\circ$  as well for an aperture angle of  $0^\circ$ , the intrinsic birefringence disappears.

[0040] The definition of the aperture angle  $\theta$  and the azimuth angle  $\alpha$  is shown in Figure 3. For the example of Figure 2, the z axis points in the (100) crystal direction; the x axis points in the (101) crystal direction.

[0041] It is known from measurements that for beam propagation in the (110) crystal direction a birefringence of  $(.65 \pm 0.4)$  nm/cm occurs at a wavelength of  $\lambda = 156.1$  nm for calcium fluoride.

[0042] Figure 4 shows the intrinsic birefringence as a function of the aperture angle  $\theta$  for the azimuth angle  $\alpha = 0^\circ$ . The value for the intrinsic birefringence of 6.5 nm/cm at the aperture angle  $\theta = 45^\circ$  matches the experimental result. The shape of the curve proceeds from the assumption of the model that the intrinsic birefringence does not increase until after an aperture angle of  $\theta = 25^\circ$ .

[0043] Figure 5 shows the intrinsic birefringence as a function of the azimuth angle  $\alpha$  for the aperture angle  $\theta = 45^\circ$ . The four digit symmetry is obvious. The shape of the curve considers the fact that the intrinsic birefringence disappears at an azimuth angle of  $\alpha = 45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  and  $315^\circ$ .

[0044] Figure 6 is a sectional view of the lens of a refractive projection lens 611 for the wavelength 157 nm. The optical data for this objective are listed in Table 1. The embodiment is taken from the patent application PCT / EP 00 /

13184 of the applicant and corresponds there to Figure 7 or Table 6. For a more detailed description of the operating mode of the objective reference is made to the patent application PCT / EP 00 / 13184. All lenses of this objective are made of a calcium fluoride crystal. The image-sided numerical aperture of the objective is 0.9. The imaging performance of this objective is so well corrected that the deviation from the wave front of an ideal spherical wave is less than  $1.8 \text{ m } \lambda$ , based on the wavelength of 157 nm. Precisely with these high performance objectives it is necessary that the disturbing effects, like those of the intrinsic birefringence, are reduced as far as possible.

[0045] For the embodiment of Figure 6, the aperture angles  $\alpha$  of the marginal ray 609 were calculated for the individual optical elements L601 to L630. In this respect the marginal ray 609 starts from the object point with the coordinates  $x = 0 \text{ mm}$  and  $y = 0 \text{ mm}$  and exhibits in the image plane an angle with respect to the optical axis, which corresponds to the image-sided numerical aperture. Therefore, the marginal ray 609 is used, because for it the result is almost the maximum aperture angles inside the optical elements. The aperture angles  $\alpha$  for the marginal ray 609 are listed in Table 2.

Table 2

[key to Table 2:]

German	English
Linsen-Nr. =	lens number
Oeffnungswinkel =	aperture angle

[see source for numbers in the table]

[0046] It can be inferred from Table 2 that the aperture angles  $\theta$  for the lenses L608, L617, L618, L619, L627, L628, L629 and L630 are larger than  $25^\circ$ ; for the lenses L618, L627, L628, L629 and L630 even larger than  $30^\circ$ . At least for these lenses, therefore, the element axis should be oriented in the (100) crystal direction. Especially affected by the high aperture angles are the lenses L627 to L630, which lie the closest to the image plane. So that the disturbing effect of the intrinsic birefringence of these four lenses does not superimpose additively, these four lenses should be arranged so as to rotate in opposite directions about the optical axis. The rotational angle between two

adjacent lenses can be, for example,  $45^\circ$ , so that for one of the lenses a light ray can pass through an azimuth angular range with maximal intrinsic birefringence, and for the next lens, through an azimuth angular range with minimal intrinsic birefringence. It is also possible to set the rotational angles of these four lenses, arranged in the final end in the path of the light ray, in such a manner that the azimuth angular ranges with maximal intrinsic birefringence are rotated by  $22.5^\circ$  respectively. Even arbitrary angular ranges are possible. Important is only that the disturbing effect of the intrinsic birefringence on the entire wave front is minimal.

[0047]The design of the projection lens achieved the goal that the maximum aperture angle of all of the light rays is less than  $45^\circ$ . The maximum aperture angle for the marginal ray is  $39.4^\circ$  for the lens L628. The use of two thick plane lenses L629 and L630 directly in front of the image plane was helpful.

[0048]The diameter of the stop, which is located between the lenses L621 and L622, is 270 mm. The diameter of the lens L618 is 207 mm; and the diameters of the lenses L627 to L630 are all less than 190 mm. Thus, the diameters of these lenses, exhibiting high aperture angles, are less than 80% of the diameter of the stop.

[0049]Figure 7 is a sectional view of the lens of a catadioptric projection lens 711 for the wavelength 157 nm. The optical data for this objective are listed in Table 3. The embodiment is taken from the patent application PCT / EP 00 / 13184 of the applicant and corresponds there to Figure 9 or Table 8. For a more detailed description of the operating mode of the objective reference is made to the patent application PCT / EP 00 / 13184. All lenses of this objective are made of a calcium fluoride crystal. The image-sided numerical aperture of the objective is 0.8.

[0050]For the embodiment of Figure 7, the aperture angles  $\alpha$  of the marginal ray were calculated for the individual optical elements L801 to L817. In this respect the marginal ray starts from the object point with the coordinates  $x = 0$  mm and  $y = 0$  mm and exhibits in the image plane an angle relative to the optical axis that corresponds to the image-sided numerical aperture. It is absolutely customary to calculate this theoretic ray, even if it does not correspond to any physical light ray, because the objectives of this type

exhibit an off-axial field. The aperture angles  $\alpha$  for the marginal ray are listed in Table 4.

Table 4

[key to Table 4:]

German	English
Linsen-Nr. =	lens number
Oeffnungswinkel =	aperture angle

[see source for numbers in the table]

[0051] It can be inferred from Table 4 that the aperture angles  $\theta$  for the lenses L815 to L817 are larger than  $25^\circ$ . At least for these lenses, therefore, the element axis should be oriented in the (100) crystal direction. Even in this embodiment the lenses L815 to L817, which lie the closest to the image plane, exhibit large aperture angles. So that the disturbing effect of the intrinsic birefringence of these three lenses does not superimpose additively, these three lenses should be arranged so as to rotate in opposite directions about the optical axis. In this respect the rotational angle between two adjacent lenses can be, for example,  $45^\circ$ , so that for one of the lenses a light ray can pass through an azimuth angular range with maximal intrinsic birefringence; and for the next lens, through an azimuth angular range with minimal intrinsic birefringence. It is also possible to set the rotational angles of these three lenses, which are arranged in the final end in the light ray path, in such a manner that the azimuth angular ranges with maximal intrinsic birefringence are rotated by  $30^\circ$  respectively. Even arbitrary angular ranges are possible. Important is only that the disturbing effect of the intrinsic birefringence on the entire wave front is minimal.

[0052] The design of the lenses L815 to L817 achieved the goal that the maximum aperture angle is less than

$$\arcsin (NA/n_{FK}) = \arcsin (0.8 / 1.5597) = 30.9^\circ.$$

The maximum aperture angle for the marginal ray is  $30.2^\circ$  for the lens L817.

[0053] Simulations with the model data for intrinsic birefringence in Figure 4 and Figure 5 have demonstrated that for the embodiment of Figure 7 the intrinsic birefringence is 16 nm, if for all of the lenses the element axes point in the (100) crystal direction; and all of the lenses are installed so as to exhibit the same orientation, thus do not rotate in opposite directions. By suitably rotating the lenses, the birefringence can be reduced to 8 nm. If, in contrast, all of the lenses are installed in such a manner that the element axes point in the (111) crystal direction, then the intrinsic birefringence is 49 nm, when all of the lenses are oriented the same. By suitably rotating the lenses the intrinsic birefringence can be reduced to 25 nanometer. The embodiment shows that for projection lenses with an image-sided numerical aperture greater than 0.8, the intrinsic birefringence can be reduced by more than a factor of three, if the element axes of the lenses do not point in the (111) crystal direction, but rather in the (100) crystal direction.

[0054] The diameter of the stop, which is located between the lenses L811 and L812, is 193 mm. The diameters of the lenses L815 to L817 are all less than 162 mm. Thus, the diameters of these lenses, which exhibit high aperture angles, are less than 85% of the diameter of the stop.

[0055] The principle construction of a microlithography - projection exposure system is described with reference to Figure 8. The projection exposure system 81 exhibits a lighting unit 83 and a projection lens 85. The projection lens 85 comprises a lens arrangement 819 with an aperture stop AP, whereby an optical axis 87 is defined by the lens arrangement 89. Embodiments for the lens arrangement 89 are depicted in Figure 6 and Figure 7. Between the lighting unit 83 and the projection lens 85 there is a mask 89, which is held in the light ray path by means of a mask holder 811. Such masks 89 that are used in microlithography exhibit a micrometer-nanometer structure that is imaged, for example, reduced by a factor of 4 or 5, on an image plane 813 by means of the projection lens 85. A light-sensitive substrate 815, or a wafer, which is positioned by means of a substrate holder 817, is held in the image plane 813.

[0056] The just resolvable minimal structures depend on the wavelength  $\lambda$  of the light used for lighting as well as on the image-sided numerical aperture of the projection lens 85, whereby the maximally reachable resolution of the projection exposure system 81 increases as the wavelength  $\lambda$  of the lighting unit 83 decreases and as the image-sided numerical aperture of the projection lens 85 increases. With the embodiment, depicted in Figure 6 and Figure 7, resolutions of less than 150 nm can be realized. Therefore, effects, like the intrinsic birefringence, have to be minimized, even if they only induce a degradation of the wave front in an order of magnitude of 10 nm. The invention succeeds in significantly reducing the disturbing effect of the intrinsic birefringence precisely for projection lenses with large image-sided numerical apertures.

TABLE 1

M1587a

[key:]

German	English
Linsen	lenses
Radien	radii
Dicken	thicknesses
Glaeser	glasses
Brechzahl bei	refractive index at
Freier Durchmesser	free diameter

[see source for numbers in table]

[page 9 of the original]

Wavelength and refractive index are listed with respect to the vacuum.

[key to page 9:]

Asphaerische Konstanten	Aspherical constants
Asphaere der Linse L601 = [see source for numbers]	asphere of the lens L601
Asphaere der Linse L604 = [see source for numbers]	asphere of the lens L604
Asphaere der Linse L605 = [see source for numbers]	asphere of the lens L605
Asphaere der Linse L607 = [see source for numbers]	asphere of the lens L607

[page 10 of the original]

[key to page 10:]

Asphaere der Linse L609 =	asphere of the lens L609
[see source for numbers]	
Asphaere der Linse L613 =	asphere of the lens L613
[see source for numbers]	
Asphaere der Linse L616 =	asphere of the lens L616
[see source for numbers]	
Asphaere der Linse L622 =	asphere of the lens L622
[see source for numbers]	

[page 11 of the original]

[key to page 11:]

Asphaere der Linse L624 =	asphere of the lens L624
[see source for numbers]	

Asphaere der Linse L625 =	asphere of the lens L625
[see source for numbers]	

Asphaere der Linse L628 =	asphere of the lens L628
[see source for numbers]	

[page 12 of the original]

TABLE 3

L61

[key:]

German	English
Linsen	lenses
Radien	radii
Dicken	thicknesses
Glaeser	glasses
Brechzahl bei	refractive index at
Freier Durchmesser	free diameter

[see source for numbers]

[key to page 13:]

Asphaere der Linse L801 =	asphere of the lens L801
[see source for numbers]	

Asphaere der Linse L803 =	asphere of the lens L803
[see source for numbers]	

Asphaere der Linse L803 =	asphere of the lens L803
[see source for numbers]	

Asphaere der Linse L805 =	asphere of the lens L805
[see source for numbers]	

[key to page 14:]

German	English
Asphaere der Linse L806 = [see source for numbers]	asphere of the lens L806
Asphaere der Linse L811 = [see source for numbers]	asphere of the lens L811
Asphaere der Linse L813 = [see source for numbers]	asphere of the lens L813
Asphaere der Linse L815 = [see source for numbers]	asphere of the lens L815

[key to page 15:]

German	English
Asphaere der Linse L816 = [see source for numbers]	asphere of the lens L816
Asphaere der Linse L817 = [see source for numbers]	asphere of the lens L817

**Patent Claims**

1. Optical element (1, 201, L627 - L630, L815 - L817) made of a fluoride crystal, in particular for a projection lens of a microlithography projection exposure system, whereby the optical element exhibits an element axis (EA), **characterized in that** the element axis is approximately perpendicular to the (100) crystal planes or to the (010) crystal planes or to the (001) crystal planes of the fluoride crystal.
2. Optical element (1, 201, L627 - L630, L815 - L817), as claimed in claim 1, wherein the optical element is a rotationally symmetrical lens with an axis of symmetry; and the axis of symmetry coincides with the element axis of the optical element.
3. Optical element (1, 201, L627 - L630, L815 - L817), as claimed in any one of the claims 1 or 2, wherein the fluoride crystal is a calcium fluoride crystal, a strontium fluoride or a barium fluoride crystal.
4. Projection lens (611, 711, 85) for a microlithography - projection exposure system with a plurality of optical elements (L601 - L630, L801 - L817), wherein at least one excellent optical element (201, L627 - L630, L815 - L817) is an optical element, as claimed in any one of the claims 1 to 3.
5. Projection lens (611, 711, 85), as claimed in claim 4, with an optical axis (OA), wherein the element axis of the excellent optical element coincides with the optical axis of the projection lens.
6. Projection lens, as claimed in claim 4 or 5, wherein the projection lens exhibits an image-sided numerical aperture NA, and the image-sided numerical aperture NA is larger than 0.75, in particular larger than 0.85.
7. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 6, wherein inside the projection lens light rays run from one object plane (O) to an image plane (O'); and wherein at least one light ray (609) inside the excellent optical

element exhibits a ray angle relative to the element axis that is larger than 25°, in particular larger than 30°.

8. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 7, wherein inside the projection lens light rays run from an object plane to an image plane; and wherein all of the light rays inside the excellent optical element exhibit ray angles relative to the element axis that are maximally 45°, in particular maximally

$$\arcsin (NA/n_{FK}),$$

where NA denotes the image-sided numerical aperture and  $n_{FK}$  denotes the refractive index of the fluoride crystal.

9. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 8, with a stop plane, wherein the stop plane exhibits a stop diameter; and wherein the excellent optical element exhibits an element diameter; and wherein the diameter of the element is less than 85%, in particular less than 80% of the diameter of the stop.

10. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 9, wherein the excellent optical element (L630, L817) is the optical element closest to the image plane.

11. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 10, wherein the projection lens comprises at least a first excellent optical element (L629, L816) and a second excellent optical element (L630, L817); and wherein the first excellent optical element is arranged with respect to the second excellent optical element so as to rotate at a rotational angle about the optical axis, in order to minimize the effect of the birefringence.

12. Projection lens, as claimed in claim 11, wherein the rotational angle between the first excellent optical element and the second excellent optical element is approximately 45°.

13. Projection lens, as claimed in any one of the claims 11 and 12, wherein the first excellent optical element and the second excellent optical element are arranged adjacent.

14. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 13, wherein the light rays exhibit wavelengths shorter than 200 nm.

15. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 14, wherein the light rays exhibit wavelengths shorter than 160 nm.

16. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 15, wherein the projection lens (611) is a refractive objective with lenses.

17. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 15, wherein the projection lens is a catadioptric objective (711) with lenses and at least one concave mirror (Sp2).

18. Projection lens, as claimed in any one of the claims 4 to 17, wherein all of the refractive optical elements are made of calcium fluoride.

19. Projection lens for a microlithography - projection exposure system with an optical axis, which comprises a plurality of optical elements made of a fluoride crystal, wherein the optical elements exhibit element axes, which are centered relative to the optical axis, and wherein the optical elements exhibit azimuth angular ranges of increased birefringence as a function of the crystal structure, characterized in that at least two optical elements are arranged so as to rotate in opposite directions about the optical axis, in order to minimize the effect of birefringence.

20. Microlithography - projection exposure system (81), comprising

- an illumination system (83),
- a projection lens (85), as claimed in any one of the claims 1 to 19, which images a structure-carrying mask (89) on a light sensitive substrate (815).

21. Process for manufacturing semiconductor components with a microlithography - projection exposure system (81), as claimed in claim 20.

-----  
8 pages of drawings  
-----

Drawings Page 1

Number: DE 101 23 727 A1

Int. Cl.<sup>7</sup>: G 02 B 1/02

Disclosure Date: November 21, 2002

[see source for figure]

102 470 / 458

Drawings Page 2

Number: DE 101 23 727 A1

Int. Cl.<sup>7</sup>: G 02 B 1/02

Disclosure Date: November 21, 2002

[see source for figure]

102 470 / 458

Drawings Page 3

Number: DE 101 23 727 A1

Int. Cl.<sup>7</sup>: G 02 B 1/02

Disclosure Date: November 21, 2002

[see source for figure]

102 470 / 458

Drawings Page 4

Number: DE 101 23 727 A1

Int. Cl.<sup>7</sup>: G 02 B 1/02

Disclosure Date: November 21, 2002

[see source for figure]

102 470 / 458

Drawings Page 5

Number: DE 101 23 727 A1

Int. Cl.<sup>7</sup>: G 02 B 1/02

Disclosure Date: November 21, 2002

[see source for figure]

102 470 / 458

Drawings Page 6

Number: DE 101 23 727 A1

Int. Cl.<sup>7</sup>: G 02 B 1/02

Disclosure Date: November 21, 2002

[see source for figure]

102 470 / 458

Drawings Page 7

Number: DE 101 23 727 A1

Int. Cl.<sup>7</sup>: G 02 B 1/02

Disclosure Date: November 21, 2002

[see source for figure]

102 470 / 458

Drawings Page 8

Number: DE 101 23 727 A1

Int. Cl.<sup>7</sup>: G 02 B 1/02

Disclosure Date: November 21, 2002

[see source for figure]

102 470 / 458